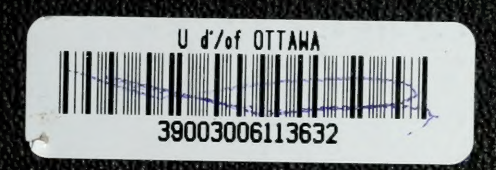
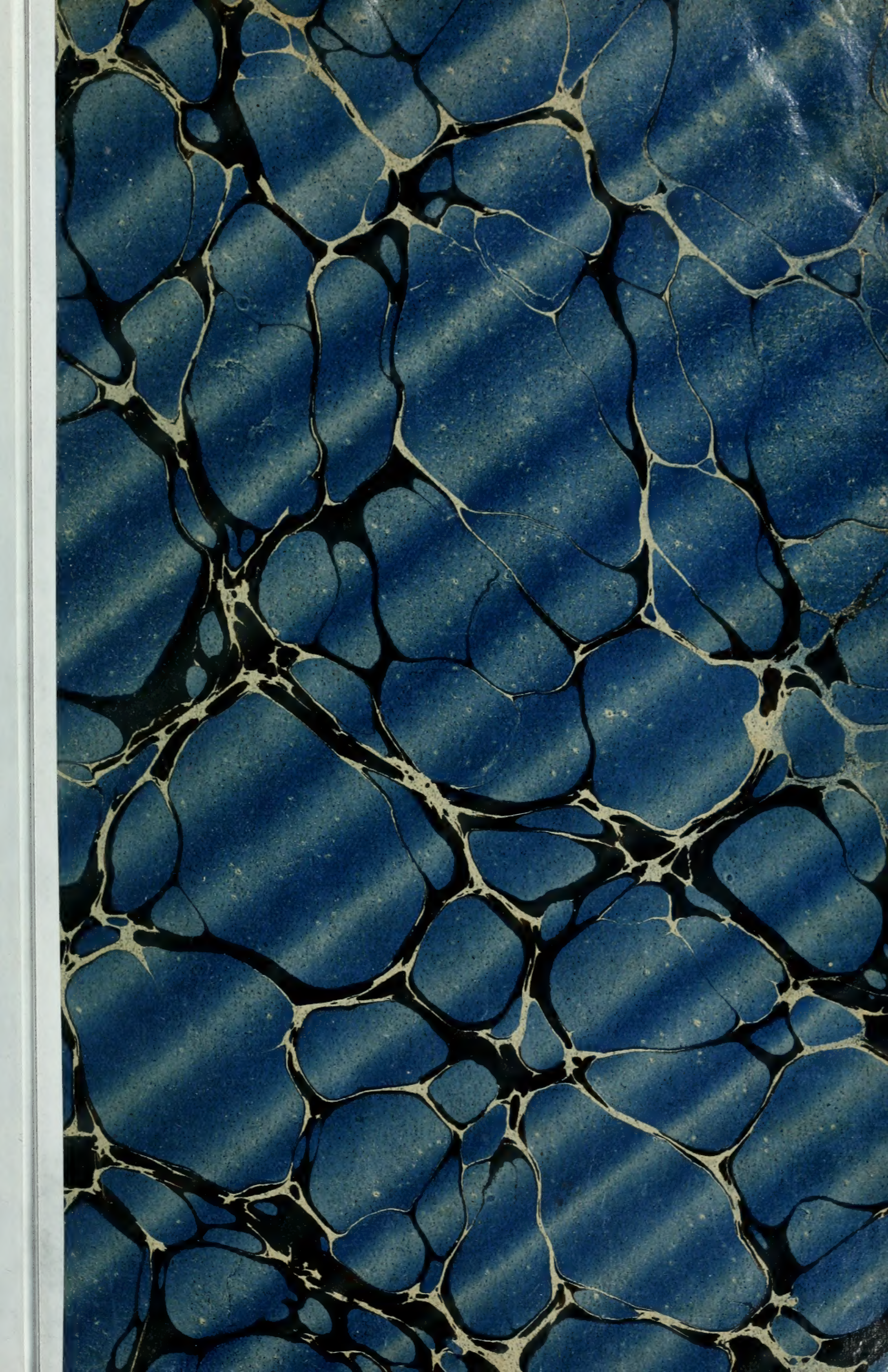

U d'/of OTTAWA
39003006113632

Digitized by the Internet Archive
in 2011 with funding from
University of Toronto

http://www.archive.org/details/coursdeminralo00lapp



Ch
4A
7

Bibliothèque des Professeurs.

Université d'Ottawa.

UNIVERSITAS OTTAVIENSIS O. M. I.

COURS

DE

MINÉRALOGIE

DU MÊME AUTEUR

Traité de Géologie. *Cinquième édition, entièrement refondue et considérablement augmentée.* 3 volumes gr. in-8 de XVI-2016 pages avec 883 gravures dans le texte . . . . 38 fr.

Abrégé de Géologie. *Sixième édition, revue et augmentée.* 1 volume in-18 avec 163 gravures dans le texte et une carte géologique de la France en couleurs, cartonné toile. . . . . 4 fr.

Leçons de géographie physique. *Troisième édition, entièrement refondue et augmentée.* 1 volume gr. in-8 avec 203 figures dans le texte et une planche en couleurs . . . . 12 fr.

Précis de Minéralogie. *Cinquième édition, revue et corrigée.* 1 volume in-18 avec 335 gravures dans le texte et une planche chromolithographiée, cartonné toile. . . . . 5 fr.

La Géologie en chemin de fer. *Description géologique du Bassin parisien* (Bretagne aux Vosges, Belgique à Auvergne). 1 volume in-18 avec une carte géologique et une carte hypsométrique coloriée, et des coupes, cartonné. . . . . . . 7 fr. 50

1228-07. — Coulommiers. Imp. Paul BRODARD. — 12-07.

COURS

DE

MINÉRALOGIE

PAR

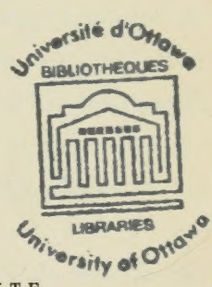
A. DE LAPPARENT

SECRÉTAIRE PERPÉTUEL DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

PROFESSEUR A L'ÉCOLE LIBRE DE HAUTES ÉTUDES

QUATRIÈME ÉDITION

REVUE ET CORRIGÉE



AVEC 630 GRAVURES DANS LE TEXTE

ET UNE PLANCHE CHROMOLITHOGRAPHIÉE

UNIVERSITAS OTTAVIENSIS O. M. I.

PARIS

MASSON ET Cie, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1908





Tous droits de traduction et de reproduction réservés
pour tous pays.

QE
366
.L3C
1908

PRÉFACE

Lorsqu'en 1876 l'auteur de ce livre fut appelé à l'honneur d'occuper une chaire dans l'Université libre qui venait de se fonder, ses travaux jusqu'alors avaient eu la géologie pour objet exclusif. Obligé de joindre à l'enseignement de cette science celui de la Minéralogie, il dut tout d'abord, à ce point de vue, refaire sa propre éducation, en ravivant des souvenirs d'école déjà vieux de quinze années.

C'était justement l'heure où Mallard, après avoir introduit, dans son Cours à l'École des Mines, les théories trop longtemps ignorées de Bravais, publiait sur les *Anomalies optiques* un mémoire qui allait renouveler la face de la science, et faire resplendir avec un éclat particulier le bel édifice doctrinal à la construction duquel avaient antérieurement travaillé les Romé de l'Isle, les Haüy, les Delafosse et les Bravais.

Séduit par l'idée de rendre accessibles aux étudiants de licence ces doctrines, aussi françaises par leur origine que par leur claire allure, mais dont la jouissance paraissait jusqu'alors réservée à ceux qui savaient manier avec aisance l'instrument des hautes mathématiques, le professeur de l'Université libre s'appliqua sans relâche à en simplifier l'exposition. Une expérience de quelques années lui ayant donné à penser que l'essai n'avait pas été infructueux, il céda aux sollicitations de ses élèves, trop souvent embarrassés de ne pouvoir retrouver, dans aucun livre, l'exact équivalent des leçons entendues, et publia en 1884, dans ce qu'il croyait être leur intérêt exclusif, la première édition de ce *Cours*.

L'accueil inattendu fait à l'ouvrage, dont une seconde édition

devenait nécessaire en 1889, imposa de nouveaux devoirs à l'auteur. En même temps qu'il cherchait à faire profiter l'édifice théorique des beaux compléments qu'y apportaient les études de Mallard sur l'isomorphisme et le polymorphisme, il s'efforçait aussi de rendre la partie descriptive aussi substantielle que possible, d'y introduire tout ce qui pouvait servir de préparation aux études de pétrographie, alors en voie de rapide développement, enfin de contrôler avec la dernière rigueur l'exactitude des données numériques. C'est ainsi qu'en 1899 il put faire paraître une troisième édition, sensiblement améliorée, du *Cours de Minéralogie*, pour laquelle il avait d'ailleurs bénéficié des précieux renseignements contenus dans le *Handbuch der Mineralogie* de M. Hintze, dans la dernière édition du *System of Mineralogy* de J.-D. Dana, enfin et surtout dans l'ouvrage de M. Lacroix sur *Les Minéraux de la France.*

Au moment même où s'achevait cette troisième édition, paraissaient les travaux de M. F. Wallerant (1) sur les groupements cristallins. Par là semblaient dissipées quelques obscurités qu'avaient pu laisser subsister les théories antérieures, en même temps qu'un ordre très séduisant s'introduisait dans le sujet si difficile et si compliqué des macles.

La nouvelle doctrine, loin de rien répudier d'essentiel dans l'œuvre poursuivie d'Haüy à Mallard, empruntait à ce dernier la féconde notion de *symétrie-limite*, pour en faire, par une heureuse extension, le pivot de toutes ses conceptions. Son apparition ne pouvait manquer de faire naître, chez l'auteur du *Cours de Minéralogie*, le désir d'associer ses élèves et ses lecteurs au bénéfice de telles innovations. Aussi n'a-t-il pas hésité devant le travail de refonte qui s'imposait à lui pour réaliser ce dessein.

Il n'a pas reculé davantage devant la crainte de nuire au prestige de la science, en laissant voir trop clairement qu'elle admet sans cesse de nouveaux perfectionnements, de telle sorte que l'œuvre accomplie n'est jamais définitive. Tenir la théorie en suspicion parce qu'elle est indéfiniment perfectible, et vouloir l'écarter pour s'en tenir au simple enre-

(1) Recueil *Scientia*.

gistrement des faits, serait, à notre sens, aller directement à l'encontre du véritable esprit scientifique. A la suite de M. H. Poincaré (1), nous aimons à répéter que « le savant doit ordonner : on fait la science avec les faits comme une maison avec des pierres ; mais une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison ».

C'est la pensée que nous exprimions dès 1884, en présentant la première édition du *Cours*. Nous disions alors : « Ce qui nous a surtout déterminé à prendre la plume, c'est le désir de faire apprécier la beauté de l'édifice doctrinal de la minéralogie. S'il est une science où la grande notion d'*ordre* brille dans tout son jour, c'est bien celle qui s'occupe de la matière cristallisée. La géométrie, cette suprême expression de l'ordre naturel, n'y apparaît pas seulement, ainsi qu'elle fait dans l'astronomie, comme résultat définitif de l'observation et du calcul. Elle resplendit du premier coup, pour ainsi dire, dans l'admirable régularité des formes cristallines et cette impression s'accroît encore quand, à l'aide des phénomènes optiques, on pénètre jusque dans la structure intime des cristaux. Nulle autre science concrète n'atteint un pareil degré de précision, comme aussi nulle autre ne donne une idée aussi nette de l'harmonie des phénomènes matériels.

» C'est donc faire œuvre philosophique que de contribuer à répandre la connaissance d'un tel ensemble, et la tâche est d'autant plus propre à nous tenter qu'elle nous fournit l'occasion de mettre en lumière la part prépondérante que les savants français ont prise à la construction de ce bel édifice. Sans doute, l'évolution doctrinale qui, dans l'espace d'un siècle, s'est poursuivie, de Romé de l'Isle, par Haüy, Delafosse et Bravais, jusqu'à Mallard, peut rester plus ou moins indifférente à ceux de qui l'ambition scientifique se déclare satisfaite par la simple constatation des phénomènes. Mais elle prend un tout autre caractère quand on a l'esprit préoccupé de la recherche des causes, ou même simplement quand on croit à la nécessité de grouper les données de l'observation

(1) *Discours au Congrès de Physique de 1900.*

dans un cadre logique, qui, sans avoir la prétention d'en fixer à tout jamais la théorie, soit du moins de nature à faciliter beaucoup l'intelligence et la mémoire des faits. Pour nous, c'est le principal but que doive poursuivre un auteur didactique, et, parce que l'analyse rationnelle des cristallographes français nous apparaît tout à la fois comme un précieux instrument de coordination et comme un des plus beaux chapitres de l'histoire du développement de nos connaissances, nous avons voulu travailler, dans la mesure de nos forces, à augmenter le nombre de ses admirateurs. Toute notre ambition serait de pouvoir penser un jour que nos efforts dans ce sens n'ont pas été stériles et qu'ainsi la liberté d'enseignement, dont ce livre est le fruit direct, n'aura pas été sans profit pour l'avancement de la science. »

Nous n'avons rien à changer à cette déclaration, heureux de pouvoir penser que la faveur obtenue par cet ouvrage peut être interprétée comme une franche adhésion de la plupart des minéralogistes aux principes scientifiques qui n'ont cessé de nous guider.

A. de Lapparent.

TABLE DES MATIÈRES

LIVRE PREMIER

CRISTALLOGRAPHIE GÉOMÉTRIQUE

PREMIÈRE SECTION

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LA SYMÉTRIE CRISTALLINE

CHAPITRE I. — THÉORIE DES ASSEMBLAGES RÉTICULAIRES.

Chapitre II. — Principes de la symétrie cristalline.

Chapitre III. — Généralités sur les formes cristallines.

DEUXIÈME SECTION

ÉTUDE DES SYSTÈMES CRISTALLINS

Chapitre I. — Système terquaternaire ou cubique.

Chapitre II. — Système sénaire ou hexagonal.

Chapitre III. — Système quaternaire ou quadratique.

Chapitre IV. — Système ternaire ou rhomboédrique.

Chapitre V. — Système terbinaire ou rhombique (orthorhombique).

Chapitre VI. — Systèmes binaire (monoclinique) et triclinique.

CHAPITRE VII. — PRINCIPE DES MESURES ET DES CALCULS CRISTALLOGRAPHIQUES

LIVRE DEUXIÈME

CRISTALLOGRAPHIE PHYSIQUE

PREMIÈRE SECTION

PROPRIÉTÉS OPTIQUES DES CRISTAUX

CHAPITRE I. — LOIS GÉNÉRALES DE LA PROPAGATION DE LA LUMIÈRE.

CHAPITRE II. — POLARISATION PAR LES CRISTAUX BIRÉFRINGENTS.

Chapitre V. — Détermination optique des minéraux dans les plaques minces.

DEUXIÈME SECTION

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DIVERSES — GROUPEMENTS CRISTALLINS — CRISTALLOGÉNIE

Chapitre I. — Propriétés mécaniques des cristaux.

Chapitre II. — Propriétés thermiques, électriques et magnétiques.

Chapitre III. — Groupements cristallins.

LIVRE TROISIÈME

DESCRIPTION DES ESPÈCES MINÉRALES

PREMIÈRE SECTION

GÉNÉRALITÉS SUR LES ESPÈCES MINÉRALES

Chapitre I. — Composition chimique des espèces.

Chapitre II. — Détermination des minéraux.

Chapitre III. — Classification des espèces.

DEUXIÈME SECTION

DESCRIPTION DES MINÉRAUX DU PREMIER GROUPE OU ÉLÉMENTS DES ROCHES FONDAMENTALES

Premier ordre. — Éléments silicatés des roches acides.

Première classe. Éléments essentiels.

Deuxieme classe. Éléments accessoires.

Deuxième ordre. — Éléments silicatés des roches basiques.

Première classe. Éléments essentiels.

Deuxième classe. Silicates des amygdales.

Troisième ordre. — Silicates de métamorphisme.

Première classe. Silicates d'alumine.

Deuxième classe. Silicates non exclusivement alumineux.

TROISIÈME SECTION

DESCRIPTION DES MINÉRAUX DU DEUXIÈME GROUPE OU ÉLÉMENTS DES GITES MINÉRAUX

Premier ordre. — Oxydes et oxysels non métallifères.

Deuxième ordre. — Sels haloïdes.

QUATRIÈME SECTION

DESCRIPTION DES MINÉRAUX DU TROISIÈME GROUPE OU MINERAIS MÉTALLIQUES

Premier ordre. — Minéralisateurs.

Première classe. Minéralisateurs proprement dits.

Deuxième classe. Minerais des métaux acidifiables.

Deuxième ordre. — Minerais des métaux proprement dits.

CINQUIÈME SECTION

DESCRIPTION DES MINÉRAUX DU QUATRIÈME GROUPE OU COMBUSTIBLES MINÉRAUX

EXPLICATION DE LA PLANCHE

I. Figure d'interférence d'un cristal uniaxe (Calcite), taillé normalement à l'axe. Nicols croisés.

II. Figure d'interférence du même cristal aux nicols parallèles.

III. Figure d'interférence d'un cristal biaxe (Aragonite) aux nicols croisés, la trace du plan des axes coïncidant avec une des sections principales.

IV. Figure d'interférence du même cristal, avec trace du plan des axes à 45° des sections principales des nicols croisés.

V. Dispersion inclinée (Gypse).

VI. Dispersion horizontale (Orthose).

VII. Dispersion croisée (Borax).

VIII. Quartz normal à l'axe, aux nicols croisés, montrant la disparition du centre de la croix par suite de la polarisation rotatoire.

I

II

III

IV

V

VI



VII

VIII

Masson et Cie, Editeurs.

Imp. Dufrénoy.

COURS

DE

MINÉRALOGIE

INTRODUCTION

DÉFINITION DE LA MINÉRALOGIE

La Minéralogie, considérée dans son acception la plus générale, est la branche de l'histoire naturelle qui a pour objet la connaissance des corps *inorganiques* ou *minéraux*. C'est à elle qu'il appartient de définir les diverses *espèces* entre lesquelles peuvent se répartir les innombrables individus dont se compose le règne minéral, et de nous mettre ainsi en possession de procédés simples, pour reconnaître tous ceux de ces corps qui recèlent des substances utiles.

Ainsi compris, le domaine de la Minéralogie est immense et il devient indispensable de le subdiviser en parties, dont chacune puisse être étudiée pour elle-même et par un ensemble de méthodes qui lui soient propres. En premier lieu, on est convenu de borner la Minéralogie à la connaissance des *espèces simples*, réservant à la *Géologie* et aux sciences qui s'y rattachent le soin d'étudier le mode de groupement de ces espèces et la façon dont elles interviennent dans la construction de l'écorce terrestre. Ensuite l'usage a prévalu de limiter la compétence du minéralogiste aux espèces que la nature nous offre à l'état de liberté, laissant à la *Chimie minérale* celles qui n'ont encore été obtenues que par l'emploi de procédés de laboratoire, dits procédés chimiques. Et comme c'est précisément à ces procédés qu'il faut recourir pour déterminer la composition des espèces, le soin de cette détermination a été, du même coup,

abandonné à la Chimie. Enfin on a l'habitude d'exclure du programme de la Minéralogie tous les corps qui, dans les circonstances ordinaires, affectent l'état liquide ou l'état gazeux. De la sorte, cette science a cessé d'être l'histoire générale des corps inorganiques, pour devenir simplement l'*histoire naturelle et descriptive des espèces minérales qui composent la croûte du globe*.

On ne saurait méconnaître l'avantage qu'il y a, pour la pratique comme pour l'enseignement, à spécialiser, ainsi qu'on vient de l'indiquer, le domaine de la Minéralogie. Le but immédiat de cette science se trouve mieux défini; ses procédés d'investigation, presque tous empruntés aux ressources de la Physique, sont plus simples et plus homogènes. Il est aussi plus facile de trouver réunies, chez un même observateur, les aptitudes que réclame leur maniement. Néanmoins, il importe de se souvenir que ces restrictions, apportées au cadre de la Minéralogie, n'ont pas leur raison d'être dans l'essence même des choses. Assurément, les corps minéraux artificiellement obtenus par les chimistes n'ont pas moins de droits que les autres à l'examen du minéralogiste. Chacun d'eux peut être retrouvé, quelque jour, dans un gisement jusqu'alors inconnu et prendre ainsi sa place parmi les produits du grand laboratoire de la nature. Il suffit d'ailleurs qu'il constitue une espèce stable et distincte, pour qu'il y ait lieu de l'admettre dans la famille des corps minéraux, en le groupant avec ceux près desquels le placent ses affinités. Nombre des plus récentes et des meilleures conquêtes de la cristallographie sont dues à l'étude de cristaux, non seulement artificiels, mais encore dérivés de substances dites organiques. Et certes il est malaisé de comprendre pourquoi, par exemple, le soufre fondu dans les laboratoires devrait être laissé aux chimistes, tandis que le soufre cristallisé dans les fissures des solfatares naturelles appartiendrait de droit aux minéralogistes.

A cette raison de logique vient s'en joindre une autre, tirée du but élevé que toute science digne de ce nom doit s'efforcer d'atteindre. Si la Minéralogie n'était qu'un moyen pratique d'arriver à la connaissance des substances minérales utiles, on ferait sagement d'en restreindre systématiquement le programme et d'écarter le plus possible de son chemin l'intervention des autres sciences qui s'y peuvent rattacher. Mais alors la Minéralogie ne serait plus une science; ce serait un *art*, *l'art de distinguer les minéraux*, et l'on ne devrait la considérer que comme le prologue indispensable de l'*art des mines*. C'est bien ainsi du reste que l'avait conçue, à la fin du siècle dernier, l'esprit éminemment pratique de Werner, lorsque, détachant de son domaine la *Minéralogie géographique* ou *Géognosie*, la *Minéralogie chimique* et la *Minéralogie économique*, il en avait fait simplement ce qu'il nommait l'*Oryctognosie*.

Mais ce qui pouvait convenir aux besoins de l'illustre professeur de Freiberg ne répondrait plus aux légitimes aspirations de l'esprit scientifique moderne. De nos jours, une science doit avoir des visées plus hautes que la connaissance d'un certain groupe d'objets en vue de la satisfaction des besoins matériels de

l'homme. Les efforts du savant doivent tendre sans cesse à remplacer la notion des corps concrets par celle d'abstractions bien choisies et à résumer les rapports mutuels de ces abstractions dans la grande idée d'*ordre*, en formulant, à l'aide du langage rigoureux des mathématiques, les lois harmoniques qui président à toute une catégorie de phénomènes similaires.

C'est ainsi que la Minéralogie commence par substituer, à la notion des minéraux utiles, celle des *substances minéralisées*. De là elle s'élève aux idées de forme cristalline, de propriétés physiques, de composition et de structure interne; alors naît pour elle le devoir de nous apprendre par quelles lois la forme et les propriétés des corps sont liées entre elles et à la nature des substances composantes. Or si l'on peut espérer d'atteindre un tel résultat, ce ne saurait être, évidemment, en se cantonnant, de propos délibéré, dans le domaine limité que nous avons défini. C'est pourquoi, tout en nous conformant, dans la partie descriptive du Cours, aux règles consacrées par l'usage, nous nous affranchirons, dans la partie théorique, de ces étroites restrictions. Nous raisonnerons d'une manière générale, comme si tous les corps minéraux devaient rentrer dans notre cadre et, quand les objets naturels ne nous fourniront pas d'éléments suffisants pour la solution de certains problèmes, nous ne devrons pas craindre de les aller chercher dans l'étude des produits de nos laboratoires.

La Minéralogie a été classée parmi les sciences physiques. Il est certain que les procédés auxquels elle a recours sont le plus souvent ceux de la Physique, et c'est dans le matériel de cette science qu'elle puise la plupart de ses instruments de recherche, goniomètre, microscope, appareils de polarisation, etc. Sa liaison avec la Chimie n'est pas moins intime et, puisque les branches de nos connaissances doivent être groupées en raison de la nature des aptitudes qu'elles réclament, il faut reconnaître qu'on a sagement fait d'associer l'enseignement de la Minéralogie à celui des deux sciences dont elle emprunte si fréquemment le secours. D'autre part, la connaissance des minéraux, à l'aide d'un ensemble de caractères extérieurs, dont l'appréciation exige avant tout ce qu'on appelle du *coup d'œil*, rentre essentiellement dans les procédés des sciences naturelles. Au contraire, la Cristallographie, par le degré de précision qu'elle a conquis, mériterait de figurer au nombre des sciences exactes, au même titre que la Mécanique. Nulle science ne résume donc en elle-même, autant que la Minéralogie, les caractères propres aux trois catégories principales des connaissances relatives à la matière. Tant il est vrai que ces catégories ne sont que des branches du grand arbre de la *Philosophie naturelle*, comme on l'appelait si justement autrefois; et que toute science, débutant par l'observation, se perfectionnant par l'expérimentation, peut espérer d'atteindre à cet état, où les phénomènes matériels, résumés dans les notions de masse, d'espace et de temps, finissent par être susceptibles d'une expression mathématique.

L'ESPÈCE EN MINÉRALOGIE

Nous avons défini la Minéralogie : l'histoire naturelle des *espèces minérales*. Il convient donc avant tout d'indiquer ce que c'est qu'un minéral et de montrer comment on peut constituer des *espèces*, par le groupement convenable d'individus similaires.

Tous les objets matériels, à quelque règne qu'ils appartiennent, résultent de l'association de substances, que la Chimie finit par résoudre en éléments indécomposables et qui, pour ce motif, ont été appelés *corps simples*. Le nombre des corps simples actuellement connus paraît être d'environ 75 à 80, parmi lesquels près de la moitié n'ont qu'une importance tout à fait secondaire, ce qui réduit à une quarantaine le nombre des éléments réellement répandus dans la nature.

La Chimie nous enseigne aussi que, si les corps simples peuvent se mélanger en toutes quantités, ils ne peuvent s'associer, sous forme de *combinaisons* douées de stabilité et d'individualité, que suivant certaines proportions bien définies. Ainsi la quantité a d'un corps A, qui peut s'unir sans résidu à une quantité b d'un corps B, pour former un certain composé bien déterminé, doit être telle, que le rapport $\frac{a}{b}$ soit constant, quelles que soient les valeurs de a et de b. De plus, si a s'unit à b pour former un composé défini, et qu'une autre combinaison, différente de la première, soit possible entre les deux corps A et B, le rapport des quantités associées dans la nouvelle combinaison sera soit $\frac{a}{nb}$ soit $\frac{na}{b}$, n étant un nombre entier. C'est-à-dire que les quantités de l'un des corps qui s'unissent à une quantité fixe de l'autre, pour former des composés différents, sont *multiples* de l'une d'entre elles.

Ces deux lois, dites des *proportions définies* et des *proportions multiples*, ont naturellement conduit les chimistes à envisager les corps simples comme formés d'*atomes*, c'est-à-dire de particules, qui seraient les derniers éléments dans lesquels les corps pussent se résoudre. Si l'on admet, ce qui semble on ne peut plus légitime, que l'union de deux corps simples doive se faire par la juxtaposition d'un certain nombre d'atomes de l'un et de l'autre, on comprend aisément que cette union ne puisse avoir lieu que suivant des quantités définies, qui sont les poids respectifs des groupes d'atomes constituants. De même on conçoit que, si un atome d'un corps s'unit à un ou plusieurs atomes d'un autre corps pour former une première combinaison, la combinaison suivante, s'il en existe, doit exiger deux ou plusieurs atomes du premier corps, c'est-à-dire une quantité multiple de la précédente.

La conception des atomes semble d'ailleurs pleinement justifiée et même imposée par l'étude des propriétés physiques des corps. L'élasticité et la dila-

tabilité par la chaleur, en particulier, ne paraissent explicables que si l'on considère les objets matériels comme formés de particules, séparées les unes des autres par des distances dont la petitesse échappe, il est vrai, à toute mesure, mais dont les variations se traduisent par les déformations que les corps sont susceptibles d'éprouver. Quant à l'objection souvent formulée au nom des mathématiques et d'après laquelle la matière doit être divisible à l'infini, elle nous semble, dans l'espèce, assez facile à lever. Il est bien vrai que l'*étendue* se conçoit comme indéfiniment divisible; c'est-à-dire que, une portion de cette étendue étant donnée, il est toujours possible d'en imaginer une plus petite. A ce point de vue, et *en tant que douée d'étendue*, la matière est bien divisible à l'infini. Mais ce n'est pas cette matière abstraite que les chimistes et les minéralogistes ont en vue; c'est la *matière concrète*, donnant naissance à des objets doués de propriétés observables et mesurables. Or il n'y a rien de contradictoire à admettre que cette matière concrète ait une limite extrême de division, exprimée par les atomes, et au delà de laquelle l'individualité d'un corps ne pourrait plus exister.

Nous laisserons d'ailleurs de côté la question de savoir si ces derniers éléments de la matière sont eux-mêmes doués d'étendue, ou si, comme le veulent les dynamistes, ce sont de simples points matériels, où se concentrent les forces de diverses natures, dont la manifestation nous fait connaître ce que nous appelons la matière. Contentons-nous d'avoir établi qu'il est, dans l'état actuel de la science, difficile de se refuser à considérer un corps homogène comme formé de particules atomiques identiques, tenues à des distances définies les unes des autres.

Ces particules atomiques sont-elles simples, ou chacune d'elles résulte-t-elle du groupement de plusieurs atomes identiques? Diverses raisons font nettement pencher la balance en faveur de la seconde hypothèse. D'abord, la chimie nous apprend qu'il n'existe pas de combinaisons hydrogénées où il entre moins de deux particules d'hydrogène à la fois. Ensuite il est des gaz, comme le soufre sublimé, dont la densité devient, à 500 degrés, triple de ce qu'elle était à 1 000 degrés, et ce changement est accompagné d'un dégagement de chaleur, autorisant la supposition que plusieurs particules se sont condensées en une seule. C'est aussi un dégagement de chaleur qui marque, soit le passage de l'état gazeux à l'état liquide, soit la solidification des corps, de telle sorte qu'il est légitime de considérer la *molécule* élémentaire d'un corps solide comme plus condensée et plus complexe que celle du même corps à l'état gazeux (1). De la sorte, tout corps défini et homogène, même s'il est simple, s'offre à nous (surtout s'il s'agit d'un solide) comme constitué par des *molécules* identiques, dont chacune est un *édifice atomique* et forme, selon toute vraisemblance, un *polyèdre* géométrique. Ces molécules sont les derniers éléments aux-

(1) Voir P. Groth, *Festrede*, Münich, 1888.

quels un corps puisse être réduit par division, sous peine de perdre son individualité (1).

Partant de là, il est aisé de reconnaître la différence qui sépare les corps *inorganiques* ou *minéraux* des corps *organisés*. Les uns et les autres sont des *édifices moléculaires*, c'est-à-dire des assemblages de molécules. Mais tandis que les corps organisés comportent, le plus souvent, *plusieurs espèces de molécules*, les corps inorganiques n'en admettent qu'une seule. Enfin, et c'est là le caractère essentiel, chez ces derniers, l'*architecture de l'édifice moléculaire* est la même dans toutes les parties du corps, au lieu que, chez les organismes, les diverses portions de l'édifice sont distinctes par leur *nature* et leurs *fonctions*. Il règne, entre ces portions diverses, une *hiérarchie*, maintenue par une force d'ordre supérieur qui s'appelle la vie, et en vertu de laquelle chaque *organe* accomplit la fonction qui lui a été réservée dans l'ensemble du mécanisme animal ou végétal. L'*individu* est donc susceptible d'une définition précise. Né d'un germe, il pourvoit à sa croissance et à son entretien, par une suite continue de destructions et de recompositions, en faisant constamment appel au concours du dehors. Il n'est pas une de ses parties qui ne subisse un incessant renouvellement et, quand la puissance directrice ou *cause substantielle* qui coordonne les mouvements destructeurs et réparateurs de l'édifice cesse d'avoir une énergie suffisante, l'édifice se détruit, ses matériaux se dispersant pour entrer dans de nouvelles combinaisons plus simples. Mais auparavant l'individu a pourvu, par un acte spécial, à la continuation de son espèce, et des germes émanés de sa substance suivront à leur tour la même évolution.

Tout autre est le cas des corps minéraux. Quelle que soit la quantité de l'un d'entre eux que l'on considère, pourvu qu'il soit homogène, non seulement toutes les molécules constituantes sont identiques, mais l'architecture moyenne de l'édifice est la même dans toutes ses parties. Toutes sont composées de la même façon, par une simple juxtaposition de molécules. Aucune d'elles n'exerce, relativement aux autres, de prépondérance ni de fonctions spéciales. L'individu minéral n'a pas de forme ou de dimensions qui lui soient propres ou, du moins, ces deux éléments ne peuvent être définis que par la forme et les dimensions de la molécule physique, qui échappe à l'observation directe et dont le degré de symétrie seul peut nous être révélé par le mode de cristallisation. La différence de grandeur entre deux individus de même espèce résulte uniquement de ce

(1) On a cru longtemps que les molécules échappaient, par leur petitesse, à toute mesure. D'ingénieuses considérations, tirées de la théorie des gaz et de celle des phénomènes électriques, ont conduit à calculer du moins le diamètre de la sphère représentative de chaque molécule, c'est-à-dire la distance de deux molécules voisines. Pour l'exprimer en millièmes de *micron* ou millionièmes de millimètre, il faut multiplier l'unité par un coefficient qui serait 0,15 pour l'hydrogène, 0,46 pour le chlore, 1,11 pour l'argent, 1,35 pour le fer, 1,70 pour le silicium. Dans les conditions ordinaires de température et de pression, un litre de gaz doit contenir un nombre de molécules égal à $5,5 \times 10^{22}$.

D'autre part, M. Pellat a calculé (*Comptes rendus*, CXLIV, p. 904) que le rayon d'un *ion* monovalent, probablement le même que celui de l'atome, pourrait être évalué à 78 millionièmes de micron.

que, dans l'un d'eux, il y a plus de molécules juxtaposées que dans l'autre. Mais les propriétés sont identiques dans tous les deux et n'éprouvent aucune modification par l'addition ou l'enlèvement d'un nombre quelconque de molécules de même nature. L'individu n'a pas, à proprement parler, de phases dans son existence. Il ne naît point d'un germe, il ne se nourrit pas, il ne tend pas vers une fin spéciale. Formé, soit brusquement, soit à plusieurs reprises, par la juxtaposition de particules identiques, il est destiné à demeurer le même, invariable dans sa nature comme dans sa structure, aussi longtemps qu'aucune variation dans les circonstances extérieures ne sera venue détruire son équilibre.

Toutefois cet équilibre est loin d'être le repos absolu. La physique moderne nous porte à admettre que chaque particule d'un corps est animée d'un mouvement en rapport avec son état calorifique. Si le corps est solide, la particule vibre autour de son centre de gravité; s'il est liquide, ce mouvement se transforme en rotation ; enfin, dans le cas des gaz, le centre de gravité lui-même est animé d'un rapide mouvement de translation. Seulement cet état de mouvement est lié à la température extérieure et ne change pas tant que cette dernière demeure invariable.

En résumé, *l'uniformité et la stabilité de l'édifice moléculaire*, lorsqu'il n'y a pas de variations dans les circonstances du milieu ambiant, tels sont les caractères essentiels des corps minéraux, où la *cause substantielle* se réduit aux seules forces d'attraction et d'affinité, qui assurent la permanence de la molécule, c'est-à-dire de l'édifice atomique.

Cela posé, l'*espèce* en Minéralogie semblerait pouvoir être définie par la molécule chimique. L'identité spécifique comporterait alors :

1° Identité de *nature*, c'est-à-dire d'espèce, des atomes simples constituants.

2° Identité du *nombre absolu des atomes* de chaque espèce.

3° Identité dans l'*arrangement* de ces atomes autour du centre de gravité de la molécule, c'est-à-dire dans la forme du *polyèdre moléculaire*.

Tous les corps minéraux pour lesquels ces trois sortes d'éléments seraient les mêmes pourraient être dits de *même espèce*.

Malheureusement la science ne nous fournit pas le moyen d'atteindre directement les molécules; et d'ailleurs ce que nous avons dit précédemment, sur les condensations qui peuvent survenir au cours du refroidissement d'une même vapeur, montre que la *molécule chimique*, pour un corps donné, n'est un élément invariable que par rapport à certain ensemble de circonstances physiques

Si donc ce qu'on peut appeler l'*espèce minérale* ne se montre pas susceptible d'une définition rigoureuse, il en est de même *a fortiori* de l'*espèce minéralogique*. A cet égard, il convient de se souvenir que la minéralogie, à ses débuts, était une science naturelle et que si, pour l'établissement des espèces, elle avait recours à des procédés analogues à ceux de la botanique et de la zoologie,

elle était privée du criterium fondamental que ces deux sciences mettent en œuvre, celui de la filiation directe.

Dans ces conditions, il convient de se borner à définir l'espèce minéralogique en disant qu'on comprend sous cette désignation l'ensemble des corps minéraux entre lesquels l'analyse chimique ne révèle aucune différence appréciable, en même temps que les propriétés de ces corps ne trahissent aucun phénomène de *polymérisation*, et laissent soupçonner, d'autre part, une structure identique jusque dans les derniers éléments. Quant aux *variétés*, elles résulteraient, soit des divers arrangements que peuvent recevoir, selon les circonstances, des matériaux élémentaires identiques, soit de la présence habituelle d'une petite quantité de matières étrangères, suffisante pour imprimer une physionomie particulière à un corps, sans altérer pour cela son individualité spécifique.

Il arrive souvent que les caractères extérieurs introduisent, entre les variétés d'une même espèce, des différences beaucoup plus sensibles que celles qui séparent certaines espèces réellement distinctes. Par exemple, entre le cristal de roche et le silex, tous deux variétés du quartz, ou bien encore entre les deux variétés de calcite qui portent les noms de spath d'Islande et de travertin, il y a certainement plus de différence qu'on n'en observe entre la calcite ou carbonate de chaux et la dolomie ou carbonate double de chaux et de magnésie. Heureusement, à travers toutes les diversités de formes que peuvent offrir les combinaisons constituées par un même groupe d'atomes, il y a certaines propriétés physiques, telles que la densité, la dureté, la fusibilité, qui se reproduisent avec constance et permettent souvent de reconnaître l'identité d'espèce sans recourir à l'analyse chimique.

Cette analyse n'en demeure pas moins le fondement primordial de la détermination des espèces ; car seule elle peut nous révéler la nature et nous faire soupçonner le nombre des atomes constituants. On voit par là combien est intime l'union de la Minéralogie avec la Chimie minérale, union nettement entrevue par Cronstedt, au milieu du XVIII[e] siècle, et affirmée plus tard avec tant d'éclat par Berzélius. La Minéralogie ne peut pas plus se passer de la Chimie que la Géologie ne peut renoncer au secours de la Minéralogie et de la Paléontologie. Mais cette union n'implique pas la confusion des sciences, et nous avons déjà dit qu'en raison de la diversité des méthodes, il était avantageux que leurs domaines respectifs fussent distincts. Tandis que le chimiste est surtout un expérimentateur, le minéralogiste est principalement physicien et naturaliste : physicien par les instruments qu'il manie, naturaliste parce que les classifications qu'il établit doivent tenir grand compte de ces affinités naturelles d'allure et de gisement, dont l'observation peut seule nous donner la connaissance.

Mais si le minéralogiste se repose sur la Chimie du soin de déterminer la *nature* des molécules, toutes les fois que les caractères extérieurs et les réac-

tions faciles du chalumeau ne suffisent pas à l'éclairer, c'est à lui seul qu'il appartient de prononcer sur la *forme* des édifices atomiques, ou tout au moins sur leur degré de symétrie. En effet, cette symétrie s'accuse, de la façon la plus nette, dans les variétés qu'on appelle *cristallisées* et dont le caractère le plus saillant est d'offrir des formes extérieures qui sont susceptibles d'une définition géométrique.

En réalité, il n'y a pour la matière minérale que deux modes d'existence : le mode *amorphe*, où il n'existe pas, à proprement parler, d'architecture moléculaire, comme si toutes les particules avaient été jetées pêle-mêle, et le mode *cristallin*, où l'arrangement des particules est *régulier* au lieu d'être *confus*. Cet arrangement régulier se produit, comme l'enseigne l'expérience, toutes les fois qu'un minéral prend l'état solide dans des conditions de tranquillité qui annulent l'influence des perturbations extérieures. Dans ce cas, les particules, demeurées libres de n'obéir qu'à leurs actions réciproques, se disposent d'une façon régulière et symétrique. Comme conséquence, au lieu d'épouser, ainsi que font les corps amorphes, la forme du récipient qui les contient, les corps cristallisés se revêtent de faces planes aux contours géométriques; mais surtout les propriétés physiques *s'ordonnent* à l'intérieur de ces corps, et cette ordonnance se traduit par des phénomènes spéciaux, dont les plus remarquables sont ceux que les appareils optiques mettent en évidence. D'ailleurs, les admirables travaux de Bravais ont démontré que l'état cristallin n'admet d'autre raison physique que la forme même des assemblages moléculaires, de telle façon que cet état nous apporte une précieuse confirmation en faveur de la réalité des polyèdres formés par la réunion des atomes.

Tandis qu'un même minéral comporte, en théorie, une infinité de variétés amorphes, il ne peut offrir qu'une seule variété cristalline homogène, dont la vraie nature est facile à définir, malgré la diversité de formes extérieures sous laquelle elle est souvent dissimulée. C'est donc aux variétés cristallisées que la définition chimique des espèces doit être appliquée (1), et puisque cette définition a été laissée à la Chimie, on peut dire que la Cristallographie est la partie essentielle et principale de la tâche du minéralogiste. Aussi commencerons-nous par l'exposé des principes de cette science, non moins satisfaisante par la précision de ses méthodes que par les lumières qu'elle nous fournit sur la constitution intime des corps.

IMPORTANCE DU CARACTÈRE CRISTALLOGRAPHIQUE

Il a pourtant fallu de longs siècles, pour qu'on arrivât à reconnaître l'importance prépondérante de la forme cristalline dans la détermination des minéraux. Cela tient à ce qu'un même corps peut cristalliser suivant divers solides,

(1) Une exception doit être faite pour certains corps dits *colloïdes*, qui se montrent absolument réfractaires à l'état cristallin.

dont les formes extérieures n'ont, à première vue, aucun rapport sensible. Ainsi la calcite donne lieu à des rhomboèdres d'angles très différents, à des prismes hexagonaux et à des pyramides aiguës, dites scalénoèdres. De même, dans le quartz hyalin, trois des faces du pointement sextuple peuvent prédominer au point d'atrophier complètement les trois autres et, d'autres fois, une seule des six faces culminantes est bien développée, de telle sorte que le cristal semble terminé par un biseau. La dimension relative des faces et, par suite, l'aspect extérieur des cristaux, peuvent varier à l'infini et, en apparence, de la manière la plus capricieuse.

On ne doit donc pas s'étonner si, au milieu du dix-huitième siècle, la valeur du caractère cristallographique était encore assez méconnue pour que Buffon lui-même pût écrire les lignes suivantes : « En général, la forme de cristallisation n'est pas un caractère constant, mais plus équivoque et plus variable qu'aucun autre des caractères par lesquels on doit distinguer les minéraux (1). »

Il paraît cependant que la liaison qui rattache les unes aux autres les formes cristallines d'une même espèce minérale avait été entrevue, un siècle auparavant, par le Danois Sténon (2), cet homme de génie qui eut aussi le mérite de formuler les premières notions exactes sur le mode de formation des dépôts géologiques. En effet, dans sa thèse de 1669, intitulée : *De solido intra solidum naturaliter contento dissertationis prodromus*, on lit cette phrase remarquable, accompagnant l'explication des figures annexées à l'ouvrage : *In plano axis laterum et numerum et longitudinem varie mutari, non mutatis angulis.*

Ainsi Sténon avait deviné le principe de l'invariabilité des angles, base de toute la Cristallographie. Toutefois cette intuition, fondée sur l'examen de trois espèces minérales seulement, le quartz, l'oligiste et la pyrite, était destinée à demeurer stérile, parce qu'elle n'était pas justifiée par un grand nombre de mesures précises. Pour la même cause, la science ne devait pas encore profiter d'une observation faite en 1688 par Guglielmini (3), sur la possibilité de faire dériver les formes d'un sel cristallisé de l'une d'elles, choisie parmi les plus simples. En 1758, Cronstedt établissait un système chimique pour les minéraux, mais considérait les caractères cristallins comme « n'étant soumis à aucune loi ». Enfin le Français Carangeot ayant inventé le *goniomètre* par application, un autre Français, Romé de l'Isle, en tira si bon parti que, dès 1783, il était en mesure de poser le principe suivant : « Les faces d'un cristal peuvent varier dans leur figure et dans leurs dimensions relatives, mais l'inclinaison de ces mêmes faces est constante et invariable dans chaque espèce (4). » En même

(1) Cité par Leymerie, *Cours de Minéralogie*, 1867, I, p. 55.

(2) Né à Copenhague en 1638, Sténon fit de nombreux voyages et vécut quelque temps à Florence, où il embrassa l'état ecclésiastique en 1667. Il mourut vingt ans après, ayant été revêtu de la dignité épiscopale et investi par le pape des fonctions de vicaire apostolique dans le nord de l'Europe.

(3) Voir Delafosse, *Thèse sur la structure des cristaux*, p. 5.

(4) *Cristallographie*, I, p. 63.

temps, Romé de l'Isle montrait que les diverses formes cristallines d'un même minéral n'étaient que des dérivations, faciles à déduire d'une forme simple fondamentale, qui suffisait, dans la plupart des cas, pour caractériser l'espèce.

L'abbé Haüy, dont les premiers travaux remontent à la même date que la publication du livre de Romé de l'Isle, poussa plus loin encore l'esprit de généralisation. Avec la loi des *troncatures rationnelles*, qui contient en germe tout le secret de la structure cristalline, il découvrit la *loi de symétrie*, qui règle la dérivation des formes secondaires, et sut formuler, avec la dernière netteté, la distinction des six *systèmes* cristallins. Désormais la Cristallographie prenait avec éclat son rang parmi les sciences exactes, et Haüy méritait d'en être appelé le fondateur. Il ne restait plus qu'à développer son œuvre et à établir, dans tous ses détails, la classification des formes dérivées, tâche à laquelle devaient s'adonner avec succès Miller et les cristallographes allemands.

Cependant, malgré les ingénieuses conceptions d'Haüy sur la dérivation des faces par décroissement des rangées de particules intégrantes, toute donnée précise manquait encore sur la structure intime des milieux cristallins. L'hypothèse atomique, en s'affermissant de plus en plus dans le domaine de la Chimie, vint en aide aux spéculations des cristallographes. Bientôt l'étude optique des cristaux leur ouvrit de nouvelles et fécondes perspectives. C'est alors que Delafosse qui, dans sa jeunesse, avait eu l'honneur d'être associé aux travaux d'Haüy, fut conduit, par l'étude de la distribution des propriétés physiques dans les cristaux, à l'idée des *réseaux moléculaires*. Cette conception, brillamment développée en 1849 par Bravais, élargie depuis par le même auteur (1), produisit bientôt des résultats si féconds, qu'il devint possible de la donner pour base à l'enseignement de la Cristallographie, en faisant de cette dernière une science *rationnelle*, au même titre que la Mécanique. Pendant quelque temps, néanmoins, cet avantage parut n'être apprécié que des seuls mathématiciens. Mais le cours de Mallard à l'École des mines de Paris et, en 1879, le *Traité de Cristallographie* du même savant, démontrèrent que l'œuvre de Bravais pouvait être rendue accessible à tous ceux que ne déconcerte pas l'emploi de la géométrie et de l'algèbre les plus élémentaires. Mallard ne se contenta pas de cette démonstration. Il eut l'art de rattacher à la théorie même de Bravais les anomalies que les phénomènes optiques avaient permis d'enregistrer et, en même temps qu'il donnait, de tous les phénomènes de macle, une explication aussi simple qu'ingénieuse, il ajoutait, à la notion de l'isomorphisme chimique, celle de l'isomorphisme des réseaux cristallins. Enfin M. Wallerant, élargissant encore les idées de Mallard, a su fonder, sur l'idée de symétrie-limite, une synthèse aussi satisfaisante par sa simplicité que par le lien rationnel qu'elle établit entre tous les phénomènes.

Grâce à tous ces travaux, la Cristallographie n'est plus seulement une science

(1) *Études cristallographiques*, 1849, 1851, publiées de nouveau en 1866.

en possession de la précision géométrique. C'est un magnifique corps de doctrines, le plus satisfaisant que les sciences physiques aient encore édifié, où la simple notion des polyèdres particulaires, combinée avec celle de la distribution régulière des propriétés physiques, permet d'expliquer et de prévoir *a priori* toutes les propriétés de la matière cristallisée. On ne s'étonnera donc pas que nous lui donnions dans ce Cours la place d'honneur et que, reléguant à la fin les détails relatifs aux caractères des principales espèces minérales, nous consacrions nos principaux efforts à l'exposé d'une théorie qui est, à nos yeux, l'un des plus solides titres de gloire de la science française.

DIVISIONS DE L'OUVRAGE

Cet ouvrage sera divisé en trois livres. Le premier sera consacré à la **CRISTALLOGRAPHIE GÉOMÉTRIQUE**. Seulement, à l'exemple de Mallard, nous n'y comprendrons pas les phénomènes de groupement, à la connaissance desquels on ne parvient le plus souvent que par l'étude des propriétés optiques, ce qui rend nécessaire l'examen préalable de ces dernières.

Le deuxième livre comprendra la **CRISTALLOGRAPHIE PHYSIQUE**, c'est-à-dire l'étude raisonnée des principales propriétés physiques de la matière cristallisée, étude suivie, comme nous venons de l'indiquer, de celle des groupements cristallins, à laquelle se rattachent aussi étroitement la notion de l'isomorphisme et celle du polymorphisme.

Enfin on trouvera, dans le troisième livre, la **DESCRIPTION** succincte **DES PRINCIPALES ESPÈCES MINÉRALES**, précédée d'un rapide aperçu des méthodes qui président à la détermination spécifique des minéraux. On y a joint toutes les données numériques qui peuvent servir de base aux études optiques, devenues de nos jours d'un usage courant parmi les pétrographes.

Ce livre sera suivi de quelques appendices. Dans l'un d'eux, on a cherché à mettre en regard, pour les formes les plus usuelles, les notations cristallographiques qui ont habituellement cours. Un second appendice est un recueil d'indications pratiques, destiné à faciliter la détermination rapide des principales espèces minérales, d'après leurs caractères extérieurs. Enfin le troisième est un Lexique alphabétique, tenu au courant des plus récentes acquisitions de la science, et fournissant des indications sommaires sur la nature des espèces et des variétés qui n'ont pas été mentionnées dans le cours de l'ouvrage.

LIVRE PREMIER

CRISTALLOGRAPHIE GÉOMÉTRIQUE

PREMIÈRE SECTION

NOTIONS GÉNÉRALES SUR LA SYMÉTRIE CRISTALLINE

CHAPITRE I

THÉORIE DES ASSEMBLAGES RÉTICULAIRES

§ I

PRINCIPE FONDAMENTAL DE LA CRISTALLOGRAPHIE RATIONNELLE

Définition des corps cristallisés. — Un corps cristallisé est un édifice dans lequel le groupement des particules a pu se faire, en dehors de toute coercition extérieure, sous la seule action des forces attractives et répulsives qui s'exerçaient entre ces particules. A cet égard l'expérience ne laisse aucun doute. Toutes les fois que la solidification d'un corps est rapide, on obtient une masse confuse, soit amorphe, soit composée de fibres ou d'aiguilles enchevêtrées, qui ne représentent qu'un rudiment de cristallisation. Au contraire, une solidification lente donne naissance à des cristaux bien définis, d'autant plus nets et d'autant plus gros que l'opération a demandé plus de temps. Ainsi, pour obtenir de gros cristaux limpides de soufre, il faut dissoudre cette substance dans du sulfure de carbone, et laisser évaporer la liqueur, pendant des semaines ou des mois, dans l'atmosphère d'une cave.

Il est donc permis d'en déduire que l'état cristallin représente le maximum de stabilité et de régularité dont l'arrangement de la matière soit susceptible, et l'on conçoit que cette régularité tende à se traduire au dehors par la manifestation la plus évidente de l'ordre matériel, c'est-à-dire par des figures géométriques.

Toutefois cette dernière condition n'est pas absolument nécessaire et ce n'est

point, en général, dans l'arrangement des formes extérieures qu'il convient de chercher le secret de la structure cristalline. En effet, la production des faces qui limitent un cristal dépend de la manière dont s'est terminé l'apport de substance cristallisable et aussi, dans une certaine mesure, des relations établies entre le cristal en voie de formation et les objets environnants. Or, ces éléments étant accessibles à l'influence des agents extérieurs, c'est plus profondément, c'est-à-dire dans l'intérieur même du milieu cristallisé, que l'architecture des cristaux doit surtout être étudiée. Il est bien vrai que la notion des édifices cristallins ne doit son introduction dans la science qu'à la frappante régularité des formes externes. Mais aujourd'hui que, grâce aux propriétés optiques, thermiques et autres, la structure intérieure de ces édifices peut se révéler à l'aide de moyens bien plus faciles que ceux dont disposaient les premiers cristallographes, il convient de s'affranchir de la considération des formes, et de baser toute la théorie sur la symétrie intime des corps cristallisés, abstraction faite des faces qui les limitent au dehors.

Signification des formes extérieures. — Cependant l'étude des formes extérieures, là où leur développement n'a pas été gêné par le milieu ambiant, nous fournit des enseignements utiles, propres à nous mettre sur la voie des lois fondamentales de la structure interne.

En premier lieu, une espèce minérale cristallisée est presque toujours limitée par des *faces planes*; ce qui prouve que c'est *suivant des plans* que la cohésion tend à se distribuer uniformément. Ensuite une espèce donnée affecte certaines formes cristallines de préférence à toutes les autres; ainsi le cristal de roche est presque toujours à l'état de prismes à six pans, coiffés par une pyramide à six faces; la calcite est très fréquemment à l'état de rhomboèdres, et la fluorine se montre le plus souvent en cubes. Il y a donc, dans un milieu cristallisé de nature donnée, certaines *directions planes privilégiées*, suivant lesquelles les faces terminales tendent de préférence à se produire. De plus les propriétés physiques des diverses faces sont loin d'être identiques; par exemple, si les faces du prisme hexagonal, dans le quartz, ont bien le même éclat, la même dureté, les mêmes stries horizontales, elles diffèrent notablement, sous ces divers points de vue, des faces de la pyramide terminale et, parmi ces dernières, il en est trois qui se distinguent habituellement des trois autres, tant par leur développement que par l'ensemble de leurs caractères extérieurs. Mais si, sur un cristal, il existe deux faces parallèles entre elles, on peut être assuré qu'en général elles offriront des propriétés identiques.

Il résulte évidemment de ce premier aperçu que, dans un milieu cristallisé, *les propriétés physiques diffèrent suivant les directions des faces* et obéissent à un arrangement qui comporte l'identité de certaines faces planes et l'inégalité de certaines autres. Rien de pareil ne s'observe dans les corps amorphes où, par suite de la disposition confuse des particules, toutes les directions de lignes ou de surfaces peuvent se montrer équivalentes.

Invariabilité des angles dièdres. — Ce premier point établi, portons notre attention sur une collection de cristaux de même espèce et de même type, par exemple sur les prismes du quartz hyalin qui tapissent une des belles géodes de l'Oisans et du Saint-Gothard. Rien de plus capricieux, au premier abord, que la figure de ces cristaux. Les uns sont des prismes réguliers, tandis que les autres sont aplatis dans un certain sens. Il en est dont la pyramide terminale est exactement hexagonale, d'autres où trois faces sont spécialement développées, d'autres enfin où une seule face opprime, en quelque sorte, les cinq restantes, réduites à ne plus apparaître que comme de minimes troncatures sur les angles ou sur les arêtes. Cependant, à travers ces inégalités extérieures, il y a toute une catégorie d'éléments qui demeurent constants : ce sont les *angles dièdres* que les faces homologues font entre elles, ainsi que l'a depuis longtemps proclamé Romé de l'Isle.

La conséquence immédiate de cette invariabilité des angles dièdres est que tous les cristaux d'un même type, soit, pour fixer les idées, tous les prismes de

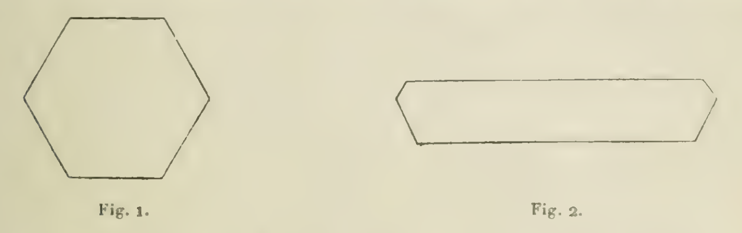


Fig. 1. Fig. 2.

quartz détachés d'une même géode, peuvent être placés de telle façon que leurs faces homologues, quel qu'en soit le développement, soient parallèles entre elles. Mais c'est tout : la position absolue de ces faces et, par suite, la figure et la dimension du polyèdre formé par leurs intersections, n'ont rien de fixe. Elles peuvent varier au point de masquer entièrement la similitude de deux cristaux, qui seraient pourtant identiques au point de vue du nombre et du parallélisme des faces. De cette manière, la section droite d'un prisme hexagonal offrira tantôt la forme régulière de la figure 1, tantôt la forme aplatie de la figure 2, où deux côtés prédominent au point d'effacer presque complètement les quatre autres, sans que, néanmoins, tous les angles cessent d'être égaux à 120°.

Identité des directions parallèles. — Or ces divers cristaux, formés dans le même milieu, sous l'empire des mêmes circonstances, peuvent être considérés comme des manières d'être diverses d'un seul corps. On est donc fondé à conclure que *toutes les faces d'un cristal peuvent être déplacées parallèlement à elles-mêmes*, sans que rien soit changé à la structure de l'édifice. Par conséquent, les faces d'un cristal représentent seulement des *directions de plans cristallographiques*, qu'on peut concevoir comme susceptibles de passer par un point quelconque, arbitrairement choisi dans le milieu. D'ailleurs il semble

naturel d'admettre qu'une face cristalline soit formée par la réunion de toutes les particules pour lesquelles, au moment de la cristallisation, les conditions intérieures étaient identiques. Et puisque le bon sens indique que, toutes circonstances égales à l'extérieur, ces conditions ne doivent dépendre que du mode de distribution des particules, il est légitime d'inférer que la répartition de la matière relativement à une face est la même pour toutes les directions parallèles à cette face.

Toutefois cette conclusion aurait besoin d'être soumise au contrôle de l'expérience et, les faces cristallines pouvant difficilement être produites à volonté, il est nécessaire de chercher cette vérification dans une propriété à la fois plus intime et plus directement accessible. Le phénomène connu sous le nom de *clivage* répond parfaitement à ce besoin.

Preuves tirées du clivage et de diverses propriétés physiques. — Le clivage est la faculté que possèdent la plupart des corps cristallisés de se diviser, sous le choc ou sous l'action du canif, en lames planes parallèles. La calcite offre trois directions de clivages également faciles, se coupant mutuellement suivant des angles dièdres de 105°5'. La galène a trois directions identiques, à angle droit les unes sur les autres. Le gypse en possède aussi trois, mais inégalement faciles, et le mica se clive suivant une seule direction, en lames dont la finesse n'est limitée que par celle des instruments employés à produire la division.

Or l'expérience montre que les plans de clivage n'ont aucune position définie dans un cristal ; leur direction seule est invariable et on peut les faire naître à volonté en un point quelconque du milieu cristallin. D'autre part, il est bien évident que ces plans ne sont autres que les surfaces de facile séparation du milieu. Ils représentent les directions suivant lesquelles la cohésion est un maximum, tandis que, normalement à ces plans, elle atteint sa plus petite valeur. Mais la cohésion, dans un milieu donné, ne peut dépendre que du mode de distribution de la matière. Le phénomène du clivage nous démontre donc trois choses : d'abord qu'il y a, dans un cristal, des surfaces privilégiées au point de vue de la cohésion ; ensuite que ces surfaces sont planes ; enfin que, pour les directions parallèles aux plans de clivage, la cohésion et, avec elle, la répartition de la matière, sont les mêmes, en quelque point du milieu que l'on fasse passer ces directions.

Cette identité de constitution suivant des plans parallèles n'est pas spéciale aux directions des clivages ou à celles des faces cristallines. Elle se vérifie encore si l'on fait appel à des propriétés physiques d'un ordre plus intime. Considérons, par exemple, la conductibilité pour la chaleur. Dans un corps amorphe, cette conductibilité est la même pour toutes les directions, quelles qu'elles soient. Si donc on cherche à la mettre en évidence en faisant fondre, à l'aide d'une tige métallique chaude, appliquée sur la surface du corps, une couche de cire préalablement étendue sur ce corps, au bout d'un temps donné,

tous les points simultanément atteints par la fusion seront distribués *sur un cercle*, et il en sera ainsi quelle que soit la direction suivant laquelle le corps amorphe a été taillé. Au contraire, avec un cristal, la courbe sera généralement elliptique, et l'ellipse, d'ailleurs parfaitement régulière, variera de forme suivant les faces considérées, d'où l'on peut déjà conclure que, dans un cristal, *la conductibilité varie avec les directions*. Mais, pour toutes les faces parallèles, en quelque point qu'elles aient été taillées, les ellipses seront semblables et semblablement placées, ce qui veut dire que la *conductibilité est la même pour toutes les directions parallèles*.

L'étude des phénomènes optiques nous fournirait des enseignements tout à fait analogues. Il en serait de même de l'élasticité, de la dilatabilité, de la dureté et, en général, de toutes les propriétés physiques. Dès lors, on peut dire que l'ensemble des faits d'expérience relatifs à la matière cristallisée se résume dans cette proposition :

Dans un corps cristallisé, les propriétés physiques, variables en général avec les directions suivies, autour d'un même point, sont absolument les mêmes pour toutes les directions parallèles, quel qu'en soit le point de départ.

Principe de la distribution de la matière cristallisée. Points homologues. — Ce point admis, il est clair que les propriétés physiques intérieures d'un corps ne peuvent varier qu'en raison du mode de distribution de la matière dans ce corps ; car les phénomènes de cohésion, de conductibilité, de propagation de la lumière, dépendent de l'écartement des particules et de l'influence qu'exerce cet écartement sur leur attraction ainsi que sur la densité du milieu vibrant intermoléculaire. L'énoncé qui vient d'être donné peut donc recevoir la forme suivante :

Dans un corps cristallisé, le mode de distribution de la matière, variable en général avec les directions suivies, autour d'un même point, est absolument le même pour toutes les directions parallèles, quel qu'en soit le point de départ.

Ainsi, dans un milieu cristallin, *il existe une infinité de points autour desquels la distribution de la matière est la même suivant les directions parallèles*. Si nous donnons, à ces centres de distribution identiques, le nom de *points homologues*, nous pourrons dire que le trait caractéristique des corps cristallisés (supposés indéfinis), est l'*existence d'une infinité de points homologues*.

Par suite, on voit nettement en quoi consiste la différence entre l'état amorphe et l'état cristallin. Dans le premier, aucune loi ne préside au groupement des particules. Toutes les directions que l'on peut concevoir dans un corps sont équivalentes, parce que l'arrangement de la matière y est également confus, en ce qui concerne tant l'orientation des particules que la valeur de leurs distances mutuelles. Tous les points du corps sont donc bien homologues, si le corps est homogène ; mais cette homologie de fait résulte de l'absence de tout arrangement : c'est donc l'*homologie dans la confusion*. Au contraire, dans un milieu cristallisé, les distances interparticulaires sont réglées, ainsi que l'orientation

des particules. Le nombre et la disposition de ces dernières varient avec les directions suivies, mais de telle façon que, dans le milieu supposé indéfini, on puisse trouver une infinité de *centres de distribution* identiques. Et c'est à ces centres, caractérisés par l'*homologie dans le groupement*, que nous avons appliqué la désignation de *points homologues*.

Le principe fondamental qui vient d'être établi est indépendant de toute hypothèse relativement à la constitution de la matière. Il subsiste, qu'on admette ou non la réalité des molécules. Ce n'est que la traduction et le résumé de tout ce que l'observation nous apprend sur les propriétés de la matière cristallisée. Mais cette traduction, qui pourrait d'ailleurs être considérée comme la définition même de l'homogénéité, est faite sous une forme assez abstraite et assez simple pour que le raisonnement géométrique y devienne applicable. C'est ce que nous allons vérifier, en démontrant que ce principe contient en germe toutes les lois de la Cristallographie, qui peuvent en être rationnellement déduites, de même que toutes les lois de la Mécanique se déduisent du double principe de l'inertie et de la composition des mouvements.

§ 2

PRINCIPE DES ASSEMBLAGES RÉTICULAIRES

Disposition des points homologues en réseaux plans. — Nous avons dit que tout corps cristallisé homogène comportait une infinité de points *homologues*, c'est-à-dire caractérisés par une égale distribution de la matière autour de chacun d'eux.

Soit A_0 (fig. 3) l'un de ces points. La seule hypothèse que nous ferons consistera à admettre que les divers homologues de A_0 ne lui sont pas contigus, autrement dit que tout milieu matériel est *discontinu* de sa nature. Ce point accepté, soit A_1 celui de tous les homologues de A_0 qui en est le plus voisin. Joignons A_0 et A_1 par une ligne droite. Le principe d'égale distribution de la matière exige qu'il y ait un point A_2, situé à droite de A_1 comme A_1 est situé à droite de A_0, c'est-à-dire sur la droite A_0 A_1 et à une distance $A_1 A_2 = A_0 A_1$. Appelons a cette distance. De même il devra exister un point A_3, situé sur la même droite, à une distance de A_2 égale à a, et ainsi de suite. Il en doit être de même à gauche de A_0. On peut donc conclure que la ligne A_0 A_1, indéfiniment prolongée à droite et à gauche, *est le lieu d'une infinité de points homologues, distants les uns des autres d'une quantité constante a*. Cette quantité est ce qu'on nomme le *paramètre* propre à la droite considérée. D'ailleurs la ligne en question ne peut contenir d'autres homologues que A_0, A_1, A_2, etc. ; car, s'il en existait un, α, entre A_2 et A_3, par exemple, le principe d'égale distribution de la matière exigerait qu'il y en eût un autre, placé de la même manière entre A_0

et A_1. Cet autre serait alors plus rapproché de A_0 que A_1, ce qui est impossible car nous avons choisi A_1 de telle sorte qu'il fût, de tous les homologues de A_0, le plus voisin de ce dernier.

Cela posé, soit A'_0 celui de tous les homologues, non encore employés, qui est à la fois le plus voisin de la ligne $A_0 A_1$ et, parmi tous ceux qui remplissent cette condition, le plus voisin de A_0. Si, par A'_0, nous menons une ligne parallèle à $A_0 A_1$, le principe fondamental exige que cette ligne soit une file d'homologues, distribués comme ceux de la file $A_0 A_1$. Il y aura donc sur cette ligne une série de points A'_1, A'_2, A'_3, séparés les uns des autres par le paramètre a. L'ensemble des points A et des points A' formera une série de parallélogrammes égaux, ayant pour côtés, avec le paramètre a, la distance $A_0 A'_0$, que nous appellerons le paramètre b. Aucun homologue ne pourra se trouver dans l'intérieur de l'un des parallélogrammes; car, s'il en existait un, il serait plus voisin que les points A' de la file $A_0 A_1$, ce qui est contraire à l'hypothèse.

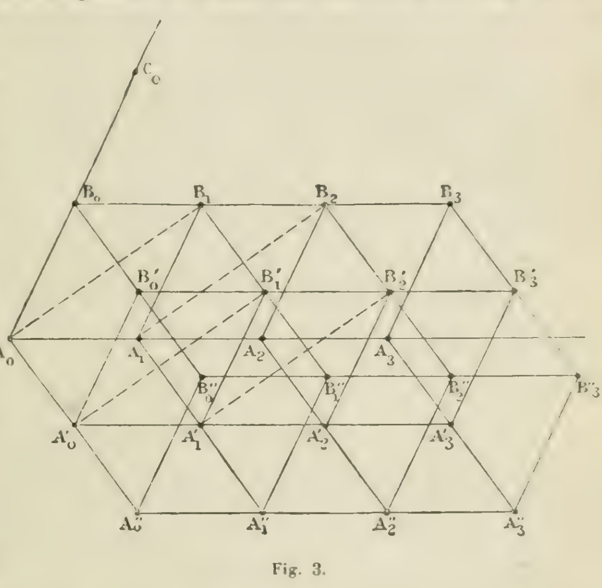


Fig. 3.

D'ailleurs, on voit aisément que les lignes $A_0 A'_0$, $A_1 A'_1$, $A_2 A'_2$, etc., doivent être aussi des files d'homologues, séparés les uns des autres par le paramètre b. Il suit de là que, dans le milieu cristallin (supposé indéfini), le plan $A_0 A_1 A'_0$ contient une infinité d'homologues, tous disposés *en quinconce*, c'est-à-dire situés sur les sommets de parallélogrammes égaux et juxtaposés, ayant pour côtés les paramètres a et b. L'ensemble des homologues situés dans ce plan formera donc *un réseau plan à mailles parallélogrammiques*, caractérisé par les grandeurs et les directions des deux paramètres a et b.

Ce réseau plan prend le nom de *plan réticulaire*. Chaque sommet de parallélogramme est un *nœud*, et les lignes $A_0 A_1$, $A'_0 A'_1$, $A_0 A'_0$, $A_1 A'_1$, etc., sont des *rangées* de nœuds, réparties en deux *systèmes de rangées*, l'un parallèle à a, l'autre parallèle à b. Deux rangées parallèles $A_0 A_1$, $A'_0 A'_1$, telles qu'il ne subsiste entre elles aucun nœud intermédiaire, sont dites rangées *limitrophes*. Enfin, sur une rangée donnée, deux nœuds que ne sépare aucun nœud intermédiaire sont également dits limitrophes.

Formation des assemblages de parallélépipèdes. — Considérons maintenant, parmi tous les homologues non encore employés, celui qui est à la fois le plus voisin du plan $A_0 A_1 A'_0$ et du point A_0; soit B_0 ce point. En vertu du principe fondamental, B_0 doit être le point de départ d'un second réseau parallèle au premier et semblablement placé. En outre, aucun homologue ne peut exister dans l'intervalle des deux plans, car il serait plus voisin que B_0 du plan initial, ce qui est contraire à l'hypothèse. Mais si l'on joint $A_0 B_0$, cette ligne formera une troisième direction de files, contenant une infinité d'homologues C_0, D_0, etc., distants les uns des autres du troisième paramètre $A_0 B_0$, que nous appellerons c. Chacun des points de la file $A_0 B_0$ deviendra l'origine d'un réseau plan parallèle aux deux premiers. De cette manière, *tous les homologues de A_0* sans exception, se trouveront répartis sur un système de plans équidistants, parallèles au plan initial $A_0 A_1 A'_0$, et séparés les uns des autres par la distance c, comptée parallèlement à $A_0 B_0$; en outre, dans chacun des plans, les homologues seront disposés *en quinconce*, formant des parallélogrammes égaux à ab et semblablement placés. On peut donc dire que, *dans un corps cristallisé, toutes les particules matérielles identiques sont disposées sur les nœuds d'un système de plans réticulaires parallèles et équidistants.*

Deux de ces plans, comme $A_0 A_1 A'_0$, $B_0 B_1 B'_0$, qui sont tels que, dans l'intervalle, il n'existe aucun nœud, sont dits *plans limitrophes*, et l'intervalle compris entre eux porte le nom de *strate*.

D'autre part, l'ensemble des lignes $A_0 B_0$, $A_1 B_1$, $A_2 B_2$, etc., constitue un plan réticulaire ayant ac pour parallélogramme constitutif et les nœuds A'_0, A''_0, A'''_0, sont les points de départ d'une infinité de plans réticulaires parallèles à ac et semblablement placés. Enfin, en combinant les rangées $A_0 A'_0$, $B_0 B'_0$, d'une part, et $A_0 B_0$, $A'_0 B'_0$, de l'autre, on forme un réseau plan ayant pour parallélogramme bc, et chacun des nœuds de la file $A_0 A_1$ est le point de départ d'un plan réticulaire semblable et parallèle.

En résumé, tous les nœuds du milieu cristallin se trouvent *simultanément* sur trois systèmes de plans réticulaires, respectivement parallèles et équidistants. Ils occupent donc les intersections mutuelles de ces trois systèmes de plans, lesquelles sont les sommets d'une suite indéfinie de parallélépipèdes égaux et régulièrement juxtaposés, tels que $A_0 A_1 A'_0 A'_1 B_0 B_1 B'_0 B'_1$, etc. Un tel assemblage de parallélépipèdes prend le nom d'*assemblage réticulaire*, et l'on dit alors qu'un cristal est caractérisé *par l'existence d'une infinité de points homologues, occupant les nœuds d'un assemblage réticulaire.* Provisoirement, cet assemblage sera défini pour nous par la grandeur et la direction des trois paramètres a, b, c, qui sont les distances d'un nœud quelconque aux trois homologues les plus voisins. Bien entendu, il ne s'agit pas des valeurs *absolues* de a, b, c, mais bien de leurs valeurs relatives, l'une d'elles, a par exemple, étant prise pour unité; car quelles que soient les valeurs absolues, si leur relation reste la même, tous les parallélépipèdes obtenus seront semblables, et c'est ce qui importe en Cristallographie.

Disposition et orientation des particules dans les assemblages cristallins. — Jusqu'ici nous n'avons fait, sur la constitution de la matière, aucune hypothèse particulière. Nous nous sommes borné à admettre que les points homologues n'étaient pas *contigus*, de telle sorte que les paramètres *a*, *b*, *c*, si petits qu'ils fussent, avaient toujours une valeur finie. Ce *postulatum* était d'ailleurs nécessité par la connaissance que nous avons des propriétés de la matière, les phénomènes d'élasticité et de dilatabilité ne pouvant s'expliquer que par l'existence d'intervalles, qui séparent les particules des corps. Revenons maintenant à la conception atomique, qui nous autorise à voir, dans un corps, une infinité de polyèdres moléculaires égaux. Il peut sembler naturel, au premier abord, de regarder les centres de gravité de ces polyèdres comme des points homologues qui, dans l'acte de la cristallisation, doivent avant tout se disposer sur les nœuds d'un assemblage réticulaire. Dans ce cas, imaginons que, du centre de gravité de l'un de ces polyèdres moléculaires, coïncidant avec un nœud tel que A_0, on mène une ligne aboutissant à l'un des sommets atomiques de ce polyèdre. Appelons $A_0\ S_0$ cette ligne, qu'il serait superflu de figurer ici par un dessin. En vertu du principe, un autre polyèdre, ayant son centre de gravité en A_1, devra posséder aussi une ligne $A_1\ S_1$, égale et parallèle à $A_0\ S_0$, et aboutissant à un sommet atomique S_1, de même nature que S. Et il en sera de même pour tous les autres sommets.

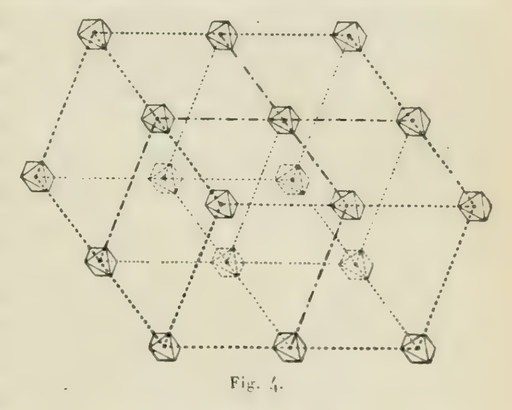


Fig. 4.

Il résulterait de là que *tous les polyèdres atomiques devraient être orientés de la même façon,* puisque toutes leurs lignes homologues seraient égales et parallèles. Ainsi l'*orientation identique des molécules* apparaîtrait comme une condition primordiale de la cristallisation. Elle pourrait d'ailleurs, semble-t-il, se justifier au point de vue mécanique. En effet, l'état cristallin est celui que prennent les corps, quand ils sont suffisamment soustraits aux influences extérieures pour n'obéir qu'à l'action mutuelle des particules. Or on comprend, sans qu'une démonstration plus rigoureuse soit nécessaire, que l'équilibre mécanique des particules sera bien plus sûrement réalisé si, déjà identiques par la forme, et disposées sur des files parallèles, elles sont aussi toutes orientées de la même façon.

D'après cela, on pourrait représenter la constitution d'un corps cristallisé par quelque chose d'analogue à la figure 4, où chaque sommet de parallélépipède porterait le centre de gravité d'un polyèdre moléculaire (auquel on a donné ici la forme d'une pyramide octaédrique).

Notion des particules complexes. — Toutefois il faut reconnaître que cette conception dépasse la portée des constatations expérimentales que nous avons tenu à donner pour base à la théorie des cristaux.

En effet, quand nous avons dit que, dans les corps cristallisés, toutes les *droites* parallèles jouissaient de propriétés identiques, et que tous les *points* du corps pouvaient, au même titre, servir de points de départ à l'étude de ces propriétés, nous interprétions des expériences qui ne s'appliquaient, en réalité, ni à des *droites géométriques*, ni à des *points géométriques*, dans la rigoureuse acception du mot.

Si délicats que soient nos appareils, ils ne nous font pas connaître les propriétés d'une droite, mais bien celles d'un *filet cylindrique* parallèle à cette droite et qui, vu l'extrême petitesse des molécules, contient sans doute un grand nombre de rangées de l'assemblage. C'est donc la moyenne des propriétés de ce groupe de rangées que nous fait connaître l'expérience. De même, quand nous parlons d'un point, ce qu'il faut entendre, c'est un élément de volume autour de ce point. De la sorte, nos expériences ne portent en aucune façon sur les intervalles intermoléculaires, qui échappent à toute mesure, et il serait abusif d'en vouloir étendre la signification jusqu'à ces ultimes éléments; et cela d'autant plus que rien ne nous garantit que le dernier élément d'un corps soit un polyèdre atomique simple.

L'expérience nous apprend, avons-nous déjà dit, que la vapeur de soufre change de densité avec la température, ce qui ne semble explicable que si la *molécule* du soufre gazeux résulte elle-même d'une agglomération de molécules simples, dont le nombre diminuerait quand la température augmenterait. A plus forte raison, s'il s'agit d'un corps cristallisé, doit-on penser que le groupement primordial est encore plus compliqué.

L'eau, qui sous forme de vapeur a bien la formule H^2O, devient, à l'état liquide, un agrégat moléculaire de formule au moins double $(H^2O)^2$; même, lorsqu'elle présente le phénomène bien connu du maximum de densité à 4°, il semble qu'on doive la considérer comme une solution de glace dans de l'eau, elle-même complexe (1).

Dans ces conditions, pour se maintenir dans les limites de l'application légitime des expériences, il est sage de se borner à envisager, comme derniers éléments d'un corps cristallisé, des *particules complexes* (2), dont chacune peut être elle-même un agrégat de molécules en plus ou moins grand nombre. Nous verrons d'ailleurs plus tard les hypothèses qu'il semble raisonnable de faire sur la constitution de ces particules. Pour le moment, c'est à elles, et à elles seules, que s'applique la notion *d'orientation identique*.

(1) Étard, *Revue générale des sciences*, 15, XII, 1901.

(2) Ce nom a été donné par M. Wallerant, par analogie avec la notion correspondante de *domaine complexe*, récemment introduite en Allemagne par M. Schoenflies dans l'étude géométrique des assemblages cristallins. C'est la *particule cristalline* de M. Wyrouboff.

Il suit de là que le phénomène de la cristallisation totale doit comporter : 1° la formation des particules complexes ; 2° l'orientation identique de ces particules ; 3° la disposition de leurs centres de gravité suivant les nœuds d'un assemblage réticulaire, d'où résulte immédiatement la limitation extérieure du corps cristallisé par des faces planes.

Ces trois conditions doivent-elles nécessairement se trouver satisfaites ensemble ? ou bien peut-il exister des corps qui ne réaliseraient que les deux premières, ou même la première toute seule ? c'est ce que nous aurons plus tard à examiner à la lumière de l'expérience.

Nous verrons alors qu'il y a de fortes raisons de penser qu'entre l'état amorphe et la cristallisation complète il doit y avoir des étapes intermédiaires, dont chacune caractérise un progrès dans l'ordonnance des parties de la matière. Mais, pour le moment, nous nous bornerons à considérer le cas où cette ordonnance est complète, les trois conditions indiquées se trouvant satisfaites à la fois.

Discontinuité de la matière cristallisée. Orientation des particules cristallines. — On remarquera d'ailleurs que cette conception, basée sur l'ensemble des faits d'expérience relatifs aux cristaux, est pleinement d'accord avec la définition théorique d'un ensemble discontinu et homogène. Il est vrai que quelques esprits se refusent à postuler cette discontinuité, se contentant de reconnaître que, dans la matière cristallisée, l'expérience révèle une *périodicité* des éléments. Quant à ces éléments eux-mêmes, on s'impose, sous prétexte de rigueur, le devoir d'en ignorer la nature.

Nous ne saurions nous arrêter à ce scrupule. Assurément il serait téméraire de croire que la science fût en état de pénétrer jusqu'à l'essence même des choses. Mais il y a des hypothèses qui nous semblent s'imposer, à la fois parce qu'elles mettent de l'ordre dans les faits et parce qu'elles répondent, mieux que toute autre conception, à l'image que nous pouvons nous faire de la réalité. Le continu est une notion purement mathématique, dont la nature, interrogée comme il convient, ne nous offre nulle part la réalisation. Nous devons donc admettre que, la matière minérale ait des parties, et que dans une matière homogène, ces parties doivent être identiques. Quant à l'hypothèse de leur orientation uniforme dans les cristaux, non seulement elle semble pleinement justifiée par le raisonnement que nous avons fait ; mais on peut dire que de tous les caractères expérimentaux mis en lumière dans le phénomène de la cristallisation, il n'en est pas de plus saillant que la tendance à l'orientation absolument uniforme des cristaux élémentaires qui viennent si souvent se grouper sous une enveloppe commune.

Ainsi on voit fréquemment de gros cristaux de quartz (fig. 5), terminés d'un côté (ici vers le bas) par le pointement pyramidal classique, tandis qu'à l'autre extrémité sortent une foule de petits prismes pyramidés, étroitement serrés les uns contre les autres, et tous ayant leurs faces homologues parallèles, ce

qui se reconnaît du premier coup d'œil au miroitement simultané des facettes conjuguées que vient frapper la lumière. D'autres fois, c'est une masse cristalline d'une substance quelconque qui vient se terminer, non par une face plane, mais par une multitude de petits cristaux, cubes ou rhomboèdres, tous parallèles les uns aux autres.



Fig. 5.

Ce n'est donc pas faire une hypothèse risquée, c'est simplement se conformer à l'expérience que d'admettre, chez les cristaux, une identité d'orientation des parties élémentaires, que vient compléter le groupement de ces parties suivant un réseau.

Signification des plans réticulaires. Existence d'une infinité de mailles. — Si maintenant nous poussons plus loin l'interprétation *physique* des assemblages réticulaires, nous reconnaîtrons que, d'après leur constitution géométrique, c'est suivant chacun des trois systèmes de plans réticulaires *ab*, *ac*, *bc*, qu'il y a identité de constitution de la matière cristallisée, et que, par conséquent, il doit y avoir identité de propriétés physiques. Mais ce privilège n'est pas particulier aux trois plans en question et une infinité d'autres sont appelés à en jouir.

Pour le bien comprendre, revenons un instant à la considération d'un seul plan réticulaire, tel que $A_0\,A_1\,A'_0$ (fig. 6). Les *files* ou *rangées* de nœuds $A_0\,A_2$, $A_0\,A''_0$, etc., par lesquelles nous avons défini ce plan réticulaire, n'ont pas, *en tant que lignes*, de réalité objective. La seule chose réelle, c'est la position absolue des nœuds. Mais si, gardant la rangée $A_0\,A_3$, nous définissions le réseau par des rangées telles que $A_0\,A'_1$, $A_1\,A'_2$, etc., tous les nœuds se trouveraient également sur les intersections mutuelles des deux systèmes de rangées choisis. Par conséquent, si l'on donne le nom de *maille* à un parallélogramme élémentaire tel que $A_0\,A'_0\,A_1\,A'_1$, on peut dire qu'un réseau donné comporte une infinité de mailles. Cependant, pour qu'un parallélogramme soit une *maille constitutive du réseau*, c'est-à-dire pour que les deux systèmes de rangées qui le limitent suffisent à définir le plan réticulaire, il faut que *tous les*

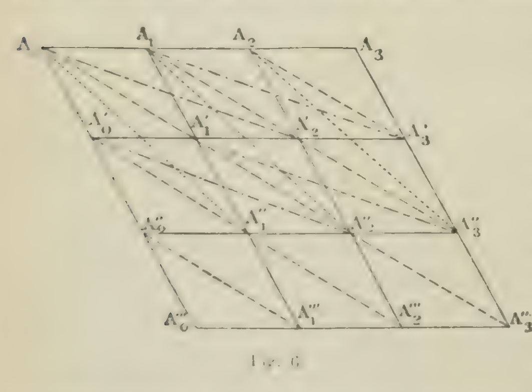


Fig. 6.

nœuds de ce plan se trouvent sur les deux systèmes de rangées et qu'aucun ne demeure à l'intérieur des parallélogrammes. Ainsi, le parallélogramme $A_0 A''_1 A_1 A''_2$ ne serait pas une maille, parce qu'il subsisterait, dans son intérieur, un nœud A'_1. Deux rangées qui satisfont à la condition indiquée, c'est-à-dire qui sont telles que le réseau formé en menant, par les nœuds de chacune d'elles, des parallèles à l'autre, comprenne, sans aucune exception, tous les nœuds du plan donné, portent le nom de *rangées conjuguées*. L'on voit de suite à quelle condition deux rangées doivent satisfaire pour être conjuguées : l'une d'elles, $A_0 A_1$, étant arbitrairement choisie, l'autre s'obtient en joignant un nœud quelconque A_0 de la première avec l'*un quelconque des nœuds* A'_0, A'_1, A'_2, etc., *de la rangée limitrophe*. Cette dernière condition pouvant être satisfaite d'une infinité de manières, en même temps que le choix de la première rangée $A_0 A'_0$, est absolument arbitraire, il en résulte qu'il y a, pour un plan réticulaire donné, *une infinité de couples de rangées conjuguées*. Néanmoins il s'en faut de beaucoup que deux rangées quelconques soient conjuguées. Ainsi $A_0 A_0'$, $A_0 A'_1$, $A_0 A'_2$, $A_0 A'_3$, sont conjuguées de $A_0 A_1$; mais $A_0 A''_1$ ne satisfait pas à cette condition, non plus que $A_0 A''_3$, parce que les nœuds A''_1 et A''_3, qui ont servi à les former, sont situés sur une rangée $A''_0 A''_3$, qui n'est pas limitrophe de $A_0 A_1$.

Parallélogramme générateur. — S'il existe, dans un plan réticulaire, une infinité de couples de rangées conjuguées, également propres à définir le réseau de ce plan, il est du moins un élément qui demeure constant : c'est le *nombre des nœuds* répartis dans une portion donnée du plan. D'ailleurs, à condition de considérer une étendue suffisamment grande, eu égard à la petitesse des divisions, pour pouvoir négliger les parties de parallélogramme qui empiètent sur les bords, il y a toujours un nombre de parallélogrammes égal au nombre des nœuds. Dès lors, de quelque manière qu'on choisisse les rangées conjuguées, la portion donnée du plan réticulaire étant constante et divisée en un nombre constant de parties, la surface de chacune d'elles est invariable. Ainsi l'*aire* des parallélogrammes ne varie pas, ce qu'on exprime en disant que, *dans un plan réticulaire, l'élément invariable est, avec la position absolue des nœuds, la surface de la maille*. Mais deux plans réticulaires peuvent différer sensiblement sous ce rapport et comme, dans la matière cristallisée, chacun d'eux peut être considéré comme une surface régulièrement chargée de centres moléculaires; comme, en outre, la force avec laquelle ces centres se retiennent mutuellement semble devoir être en rapport avec leur rapprochement, on peut entrevoir que la *cohésion*, sur une face cristalline, sera d'autant plus grande que l'aire de la maille y sera plus petite.

Quoique la division d'un plan réticulaire en parallélogrammes puisse se faire d'une infinité de manières, il y a cependant un mode de partage qui mérite d'être mis en évidence ; c'est celui qui résulte de la jonction d'un nœud A_0 aux deux homologues les plus voisins A_1 et A'_0. Dans ce cas, les longueurs a et b sont réduites au minimum. Le parallélogramme résultant peut s'appeler le

parallélogramme générateur du réseau et même on peut se borner à considérer le triangle construit sur *a* et *b*, en lui donnant le nom de *triangle générateur*. Si l'on appelle α l'angle que font entre elles les rangées conjuguées $A_0 A_1$ et $A_0 A'_0$, la surface du triangle sera

$$\frac{1}{2} ab. \sin \alpha$$

et celle du parallélogramme, c'est-à-dire l'aire de la maille, sera

$$\omega = ab. \sin \alpha.$$

Parallélépipède générateur. — Si maintenant, de la considération d'un seul plan réticulaire, nous nous élevons à celle de l'assemblage complet, il sera facile de reconnaître que sa division en parallélépipèdes est aussi arbitraire que l'était celle du plan en parallélogrammes. En effet, au lieu de joindre A_0 à B_0, nous pouvions tout aussi bien le joindre à B_1 ou à B'_0 (fig. 3). Il existe donc une infinité de manières de diviser un assemblage en parallélépipèdes. Seulement, pour que la totalité des nœuds s'y trouve comprise, il faut que la rangée, non située dans le plan initial $A_0 A_1 A'_0$, et qui sert à définir les parallélépipèdes, soit *conjuguée au plan initial*. On voit sans peine que cette condition est remplie si cette rangée résulte de la jonction d'un des nœuds du plan initial *avec l'un quelconque des nœuds du plan limitrophe*. Or le plan initial lui-même est défini par deux rangées conjuguées. On peut donc dire qu'un assemblage réticulaire est défini par *trois rangées conjuguées*, non situées dans un même plan. La première de ces rangées peut être arbitrairement choisie, parmi toutes celles que comporte l'assemblage ; mais la seconde est soumise à la condition d'unir un des nœuds de la première à un nœud de la rangée limitrophe ; et la troisième, à son tour, s'obtient en joignant un des nœuds du réseau formé par les deux premières à un nœud quelconque du réseau plan limitrophe du précédent.

Les trois rangées conjuguées, prises deux à deux, définissent *trois plans réticulaires conjugués*, et chacun de ces plans, tel que $A_0 A_1 A'_0$, est conjugué à la rangée $A_0 B_0$, formée par l'intersection des deux autres plans. Tous les nœuds de l'assemblage, sans exception, se trouvent aux intersections mutuelles des trois systèmes de plans qu'on obtient en menant, par chaque nœud de l'une des trois rangées, un plan parallèle au plan des deux autres.

En appliquant à l'assemblage le raisonnement que nous avons fait pour un plan, on reconnaît que, dans une portion donnée, il y a toujours un nombre de parallélépipèdes égal au nombre des nœuds. Le volume des parallélépipèdes est donc constant, quelle que soit la division adoptée. C'est ce qu'on exprime en disant que *le volume du noyau d'un assemblage est invariable*.

Appelons Ω ce volume et soit I le côté d'un cube ayant Ω pour volume. On a $\Omega = I^3$ ou $I = \sqrt[3]{\Omega}$. Cette quantité I est ce qu'on appelle l'*intervalle moyen des*

nœuds. Pour un corps cristallisé donné, elle peut être regardée comme une caractéristique de la cohésion moyenne à l'intérieur du corps.

Parmi tous les modes de génération d'un assemblage à l'aide de trois rangées conjuguées, il en est un qui a la prééminence sur tous les autres. C'est celui où le parallélépipède a pour arêtes les *trois plus petits paramètres conjugués* $A_0 A_1$, $A_0 A'_0$, $A_0 B_0$. Un tel parallélépipède est dit *générateur* de l'assemblage. Mais on peut se borner à considérer la pyramide triangulaire qu'on obtiendrait en joignant entre elles les extrémités A_1, A'_0 et B_0 (fig. 7). Cette pyramide ou *tétraèdre*, définie par les grandeurs *a*, *b*, *c* et les directions des trois paramètres conjugués les plus petits, issus d'un même point, portera le nom de *tétraèdre générateur*.

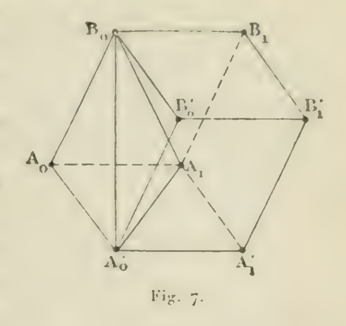


Fig. 7.

Conséquences physiques diverses de la disposition réticulaire. — La disposition réticulaire des milieux cristallisés n'étant que la traduction logique de ce que l'observation nous enseigne sur les propriétés de ces milieux, on doit pouvoir en déduire, *a posteriori*, tout ce qui constitue les caractères fondamentaux des cristaux. C'est ce qu'il va nous être facile de vérifier.

Une rangée étant donnée, par tout nœud de l'assemblage passe une rangée parallèle et de même paramètre. L'espacement des particules est le même pour toutes les rangées parallèles et dès lors les propriétés physiques de celles-ci doivent être identiques. En outre, trois nœuds de l'assemblage, c'est-à-dire trois centres particulaires, suffisent pour déterminer un plan qui contient une infinité d'autres centres, formant un réseau homogène. Et par chaque nœud de l'assemblage passe un plan réticulaire parallèle à ce plan, puisque, par ce nœud, on peut toujours mener deux rangées parallèles à deux rangées quelconques contenues dans le plan en question. Tous les plans parallèles sont d'ailleurs identiques entre eux; l'espacement et la disposition réciproques des particules y sont les mêmes, ce qui implique l'identité des propriétés physiques, constatée par l'expérience. Mais si les plans réticulaires que comporte un assemblage sont en nombre indéfini, il s'en faut de beaucoup que toute direction donnée *a priori* soit celle d'un plan réticulaire. En effet il n'y a de directions admissibles que celles des plans qui, menés par un nœud, en rencontrent au moins deux autres, et, par suite, en contiennent une infinité. Nous verrons plus loin à quel caractère on reconnaît qu'un plan mené par un nœud satisfait à cette condition.

D'après la disposition parallélépipédique des assemblages cristallins, c'est seulement suivant les rangées et les plans réticulaires qu'il y a identité de structure. On en peut donc conclure qu'un édifice cristallin se traduira, en général, au dehors, par des *arêtes rectilignes* et *des faces planes*; car les élé-

ments qui limitent un cristal, étant formés simultanément, doivent correspondre aux parties pour lesquelles, à un moment donné, toutes les conditions physiques sont les mêmes.

Influence de la densité réticulaire. Explication du clivage. — Les divers plans réticulaires sont très différemment partagés sous le rapport de la disposition des particules matérielles. Chacun d'eux est caractérisé par l'aire ω de sa maille. Or, si Ω est le volume invariable du noyau et d l'épaisseur d'une strate, c'est-à-dire la distance normale de deux plans limitrophes, on a

$$\Omega = \omega d.$$

Le produit ωd devant être constant, il faut que ω varie en raison inverse de d. En d'autres termes, plus l'aire ω de la maille est petite et plus l'épaisseur des strates doit être grande. Mais ω est d'autant plus petit que la *densité réticulaire*, c'est-à-dire le nombre des particules contenues par unité de surface dans le réseau plan, a une plus grande valeur. Ainsi plus un plan est chargé de particules et plus il est éloigné des deux plans limitrophes qui l'entourent. Par conséquent, la cohésion, qui est en rapport avec le rapprochement des particules, sera un *maximum* suivant le plan et un *minimum* dans la direction perpendiculaire. Par là s'explique la propriété du *clivage*. Un cristal se divise suivant des surfaces planes, parce que c'est sur de telles surfaces que se produit le maximum de cohésion et que les particules tendent avec le plus de force à demeurer unies. Les plans de grande densité réticulaire se séparent d'ailleurs plus aisément que les autres, parce que l'effort nécessaire pour opérer la division rencontre, entre ces plans, à cause de leur écartement, le minimum de résistance. Toutes les directions parallèles étant identiques, le même clivage doit se produire par tout le cristal avec une égale facilité et, s'il est dans l'essence du milieu qu'il s'y trouve plusieurs directions planes de même densité réticulaire, le clivage s'y produira simultanément et dans les mêmes conditions. Au contraire, aux directions d'inégale densité correspondront des clivages inégalement faciles.

D'autre part, comme l'a remarqué Bravais, les influences, tant intérieures qu'extérieures qui, à un moment donné, limitent l'apport de la substance en voie de cristallisation, peuvent être, jusqu'à un certain point, comparées aux forces qu'on emploie à cliver le cristal. Il est donc aisé de comprendre que, parmi les faces *géométriquement* possibles, celles-là se produiront de préférence, suivant lesquelles la densité réticulaire sera le plus voisine du maximum. Assurément le cas n'est pas le même que pour le clivage, à cause du rôle que jouent les actions extérieures dans la production des faces des cristaux. Néanmoins on entrevoit assez clairement la raison physique qui limite, d'une façon très étroite, la variété des faces cristallines, alors que, théoriquement, cette variété pourrait être infinie. Plus la densité d'un plan réticulaire est faible et moins, en s'y concentrant, les centres particulaires ont de chances de pouvoir

résister à l'action du dehors. Aussi est-ce seulement parmi les plans de plus forte densité réticulaire qu'une forme cristalline ira choisir les faces dont elle doit se composer.

Enfin l'épaisseur des strates étant, selon toute vraisemblance, comparable à la dimension des particules, cette épaisseur doit échapper, par sa petitesse, à toute mesure. De là vient qu'en pratique, soit les faces extérieures, soit les faces de clivage, peuvent se produire en un point quelconque du corps cristallisé. La direction seule des éléments réticulaires est invariable et, par suite, l'angle dièdre de deux faces ne peut changer, à quelque distance du milieu du cristal que ces faces se produisent.

§ 3

PROPRIÉTÉS GÉOMÉTRIQUES ET EXPRESSION ANALYTIQUE DES ASSEMBLAGES RÉTICULAIRES

Nœuds et rangées. Coordonnées numériques. Caractéristiques. — Un assemblage réticulaire est entièrement défini par trois rangées conjuguées. Représentons ces trois rangées (fig. 8) par Ox, Oy et Oz. Tout nœud tel que M ne peut se trouver qu'à l'intersection commune de trois plans, respectivement parallèles aux plans conjugués xOy, xOz, yOz et menés par trois nœuds des rangées Ox, Oy et Oz. Chacun de ces plans, tel que M P A, intercepte donc, sur l'axe qu'il rencontre, une longueur ou *coordonnée linéaire* égale à un nombre entier de paramètres. On a ainsi $OA = ma$; $OB = nb$; $OC = pc$, m, n et p étant trois nombres entiers. Par conséquent le nœud M, situé à l'extrémité, opposée à O, de la diagonale d'un parallélépipède construit sur ces trois longueurs, peut être défini par le symbole ma, nb, pc.

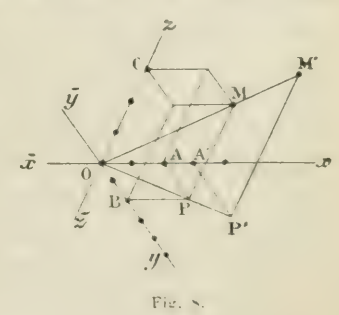


Fig. 8.

Mais, dans un assemblage donné, les paramètres a, b, c, des trois rangées conjuguées se répètent pour tous les nœuds. A condition donc de suivre toujours le même ordre et d'énumérer d'abord la longueur qui convient à Ox, ensuite celle qui se rapporte à Oy, en dernier lieu celle mesurée sur Oz, on peut se contenter de représenter un nœud M par le symbole mnp.

Ainsi un nœud est représenté par *trois nombres entiers*, qu'on appelle les *coordonnées numériques* du nœud, et dont chacun est le coefficient dont il faut affecter le paramètre correspondant pour retrouver, dans l'espace, la vraie position du nœud. Les nombres m, n et p peuvent recevoir toutes les valeurs entières possibles, depuis zéro jusqu'à l'infini, positives ou négatives

suivant qu'elles sont comptées, sur chacun des axes, à droite ou à gauche de l'origine O.

Tous les nœuds de l'assemblage étant identiques, on obtiendra *toutes les directions* de rangées admissibles en joignant l'origine O à un nœud quelconque tel que M. On peut donc prendre, pour symbole d'une rangée passant par l'origine, la même série de trois nombres entiers (mnp). Seulement, pour simplifier, il convient de choisir, pour cette définition, celui des nœuds de la rangée qui est limitrophe de l'origine. Pour le trouver, remarquons que tout nœud M', situé sur OM, est tel que l'on ait

$$\frac{M'P'}{MP} = \frac{OP'}{OP} = \frac{A'P'}{AP} = \frac{OA'}{OA}.$$

Or M' étant un nœud, on a

$$OA' = m'a, \quad A'P' = n'b, \quad M'P' = p'c.$$

Donc

$$\frac{m'a}{ma} = \frac{n'b}{nb} = \frac{p'c}{pc} \quad \text{ou} \quad \frac{m'}{m} = \frac{n'}{n} = \frac{p'}{p} = D,$$

D étant un nombre rationnel, qui peut être plus grand ou plus petit que 1, suivant que M' est plus ou moins éloigné que M de l'origine O.

Supposons que m, n et p aient un plus grand commun diviseur entier d, on aura

$$m = m_1 d, \quad n = n_1 d, \quad p = p_1 d;$$

d'où, en substituant,

$$m' = m_1 d D, \quad n' = n_1 d D, \quad p' = p_1 d D.$$

Cela posé, les nombres m', n', p', m_1, n_1, p_1, devant toujours être entiers, la plus petite valeur dont m', n' et p' soient susceptibles est celle qui correspond à $dD = 1$, auquel cas $m' = m_1$, $n' = n_1$, $p' = p_1$.

Donc, le nœud $m_1 n_1 p_1$, défini par *trois nombres premiers entre eux*, est celui qui, sur la rangée passant en mnp, est limitrophe de l'origine, et le paramètre de la rangée est la distance de cette origine au point $m_1 n_1 p_1$.

Ainsi, dans le symbole (mnp) d'une rangée, il convient que les trois coordonnées numériques ne contiennent pas de facteurs premiers communs. Ces trois nombres s'appellent alors les *caractéristiques* de la rangée.

Le symbole (mnp) peut être choisi pour désigner, non plus seulement une rangée, mais tout l'ensemble des rangées parallèles à celle qui va de l'origine au nœud limitrophe mnp.

La rangée Ox étant celle qui passe par le point $m = 1$, $n = 0$, $p = 0$, son symbole est (100). De même Oy et Oz ont respectivement pour symboles (010) et (001).

Dérivation des nœuds par la règle des résultantes — D'après le principe même des assemblages, dans un réseau plan, défini par deux rangées con-

juguées Ox, Oy, si par un nœud, tel que C (fig. 9), on fait passer deux parallèles aux axes Ox et Oy, ces lignes viennent couper les axes en deux nœuds A et B. En d'autres termes, tout nœud C du plan occupe l'extrémité de la diagonale d'un parallélogramme ayant ses côtés respectivement parallèles aux axes. Or tous les nœuds d'un réseau étant identiques, toutes les *directions de rangées* possibles doivent être données par la jonction de l'origine O avec un nœud quelconque. On peut donc dire que toutes les directions de rangées sont les diagonales de parallélogrammes construits sur Ox et Oy, et ayant pour côtés des longueurs formées d'un nombre entier de paramètres. Et comme la longueur OC, intervalle compris entre deux nœuds O et C, est soit le paramètre même de OC, soit un de ses multiples, il en résulte que les directions et les valeurs des divers paramètres admissibles s'obtiennent à l'aide des rangées conjuguées, à titre de *résultantes, par une construction tout à fait semblable à celle du parallélogramme des forces.*

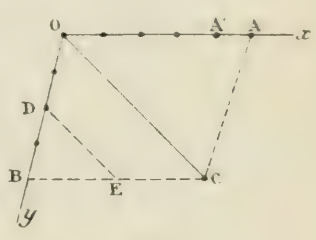


Fig. 9.

Il importe de remarquer que, si cette règle suffit à faire connaître tous les nœuds du réseau et toutes les *directions* de rangées, elle est loin de donner *toutes les rangées*. En effet, une direction OC étant connue, par tout nœud de l'assemblage, tel que D, passe une rangée DE, parallèle à OC et qui évidemment n'est pas comprise dans la construction précédente. Mais il n'est pas une seule des rangées telles que DE dont la direction ne soit définie par une rangée issue de O.

Tout nœud d'un assemblage, étant situé à l'intersection commune de trois plans, parallèles aux plans conjugués et menés par des nœuds des trois rangées conjuguées, occupe l'extrémité de la diagonale d'un parallélépipède construit sur ces rangées. Cette diagonale résultante est une rangée, dont le paramètre est, soit la longueur même de la diagonale, soit un de ses sous-multiples entiers. Les nœuds d'un assemblage dérivent donc tous les uns des autres, par une règle identique avec celle du parallélépipède des forces.

Caractéristiques des plans réticulaires. — L'équation générale d'un plan qui passe par l'origine des coordonnées est de la forme

$$Ax + By + Cz = 0.$$

Ce plan sera un plan réticulaire de l'assemblage dont Ox, Oy et Oz sont trois rangées conjuguées, si, passant déjà par l'origine, il passe aussi par deux autres nœuds mnp, $m'n'p'$. Si donc, à x, y et z, nous substituons les valeurs ma, nb, pc, puis $m'a$, $n'b$, $p'c$, nous aurons deux équations, qui permettront de déterminer les valeurs relatives des coefficients A, B, C. On trouve ainsi :

$$\frac{A}{bc\,(np' - pn')} = \frac{B}{ac\,(pm' - mp')} = \frac{C}{ab\,(mn' - nm')}$$

ou, en divisant les trois termes par abc,

$$\frac{A}{\left(\frac{np' - pn'}{a}\right)} = \frac{B}{\left(\frac{pm' - mp'}{b}\right)} = \frac{C}{\left(\frac{mn' - nm'}{c}\right)}.$$

C'est pourquoi, remplaçant les coefficients A, B, C, par leurs valeurs proportionnelles, on obtient, pour l'équation d'un plan réticulaire :

$$\frac{x}{a}(np' - pn') + \frac{y}{b}(pm' - mp') + \frac{z}{c}(mn' - nm') = 0.$$

Si les trois binômes ont un plus grand commun diviseur D, on peut poser (1)

$$\frac{np' - pn'}{D} = q, \qquad \frac{pm' - mp'}{D} = r, \qquad \frac{mn' - nm'}{D} = s,$$

et l'équation devient

$$q\frac{x}{a} + r\frac{y}{b} + s\frac{z}{c} = 0,$$

les trois coefficients q, r, s étant des *nombres entiers et premiers entre eux.*

Ainsi, un plan réticulaire est défini par *trois caractéristiques entières*, qui déterminent absolument la *direction* de ce plan relativement aux plans conjugués (2).

Le symbole (qrs), dans lequel les quantités q, r, s, désignent des nombres entiers, positifs ou négatifs, pouvant varier de zéro à $\pm\infty$, comprend donc tous les plans réticulaires admissibles dans l'assemblage considéré.

Tout plan parallèle au plan (qrs), mais ne passant pas par l'origine, doit avoir une équation de la forme

$$q\frac{x}{a} + r\frac{y}{b} + s\frac{z}{c} = k,$$

k étant un nombre quelconque. Si l'on veut que ce plan soit un plan réticulaire, il faut et il suffit qu'il passe par un nœud $m''n''p''$, puisque, à toute direction donnée de plan réticulaire correspond un plan parallèle mené par chaque nœud. Dès lors, les coordonnées $m''a$, $n''b$, $p''c$ du nœud en question satisfont à l'équation du plan, et l'on a

$$qm'' + rn'' + sp'' = k,$$

c'est-à-dire que k, somme de trois termes qui sont des produits de nombres

(1) Un mot d'explication nous paraît nécessaire pour justifier le choix des lettres q, r, s. Bravais se servait de g, h, k : divers auteurs ont adopté h, k, l ; p, q, r ; u, v, w. Cette dernière notation a l'inconvénient d'offrir une prononciation difficile ; les trois précédentes emploient au moins l'une des consonnes utilisées par Lévy pour désigner les éléments des formes simples, ce qui expose à une certaine confusion, comme on le verra plus tard, entre les symboles des éléments et leurs indices. La formule (qrs) échappe à ce reproche, ce qui nous a décidé à lui donner la préférence.

(2) C'est au savant minéralogiste anglais Miller que la science est redevable de la notation des faces à l'aide de trois caractéristiques.

entiers, *est lui-même un nombre entier*, positif ou négatif, pouvant varier de zéro à $+$ ou $- \infty$.

Le symbole (qrs) peut donc servir à désigner tous les plans réticulaires parallèles à une même direction et, suivant la valeur du terme constant k, ces plans seront plus ou moins distants de l'origine.

Plans limitrophes. Coefficients d'intersection rationnels. — Le nombre k devant être entier, la plus petite valeur dont il soit susceptible est ± 1. On peut d'ailleurs démontrer que cette valeur est admissible, et dès lors l'équation

$$q\frac{x}{a} + r\frac{y}{b} + s\frac{z}{c} = \pm 1$$

représente les deux plans limitrophes de celui qui passe par l'origine, parallèlement à la direction définie par (qrs).

En général, l'équation

$$q\frac{x}{a} + r\frac{y}{b} + s\frac{z}{c} = \pm k$$

représente les deux plans qui, de part et d'autre de l'origine, sont séparés de celle-ci par un nombre de strates égal à k.

Un plan réticulaire défini par

$$q\frac{x}{a} + r\frac{y}{b} + s\frac{z}{c} = k$$

intercepte, sur les trois axes conjugués, des longueurs qu'on obtient en faisant successivement, dans l'équation, deux des coordonnées ensemble égales à zéro. Ces longueurs sont

$$\frac{k}{q}a, \qquad \frac{k}{r}b, \qquad \frac{k}{s}c.$$

Par conséquent, les nombres $\frac{k}{q}, \frac{k}{r}, \frac{k}{s}$ sont les coefficients numériques qui, appliqués aux paramètres respectifs, définissent les longueurs interceptées. Ces coefficients sont d'ailleurs respectivement proportionnels à $\frac{1}{q}, \frac{1}{r}, \frac{1}{s}$. Donc les nombres q, r, s sont, à un facteur commun près, *les inverses des coefficients numériques* qui fixent les longueurs interceptées.

Le nombre k étant entier, ainsi que les nombres q, r, s, on voit que les quantités $\frac{k}{q}, \frac{k}{r}, \frac{k}{s}$ sont toujours des *fractions rationnelles* (1). Ainsi un plan réticulaire intercepte toujours, sur trois rangées conjuguées, des longueurs qui sont en rapports rationnels avec les paramètres correspondants.

Cette propriété s'étend d'ailleurs à toutes les rangées possibles. En effet,

(1) On appelle expression *rationnelle* une expression dont les termes ont une commune mesure : ainsi un nombre entier, ou une fraction dont le numérateur et le dénominateur sont l'un et l'autre des nombres entiers.

un plan réticulaire et une rangée étant donnés, on peut toujours prendre cette rangée comme axe des x, à condition de choisir convenablement les deux rangées conjuguées qui, jointes à la première, serviront à définir l'assemblage. Dans ce cas, l'équation du plan, relativement aux trois axes conjugués, étant de la forme habituelle, la longueur interceptée sur l'axe des x, c'est-à-dire sur la rangée donnée, est une fraction rationnelle du paramètre correspondant, ainsi qu'il vient d'être démontré. La *troncature rationnelle* par les plans réticulaires est donc un fait commun à toutes les lignes cristallographiques d'un même assemblage.

D'après la signification qui vient d'être attribuée aux *caractéristiques* d'un plan réticulaire, il est facile de déterminer celles des trois plans coordonnés. Ainsi le plan des xy est parallèle à celui qui, coupant l'axe des z au nœud 001, ne rencontre les axes des x et des y qu'à l'infini. Ce plan, limitrophe du plan des xy, a donc, pour coefficients numériques de ses intersections avec les axes,

$$\infty, \quad \infty, \quad 1.$$

Par suite, les nombres qrs, qui en sont les inverses, seront

$$\frac{1}{\infty}, \quad \frac{1}{\infty}, \quad \frac{1}{1},$$

c'est-à-dire (001). Ce sont exactement les caractéristiques de la rangée Oz, conjuguée du plan des xy. Ainsi les caractéristiques sont : pour xOy (001); pour xOz (010); pour yOz (100).

Formation des plans réticulaires. Plans et rangées conjugués. — Un assemblage étant défini par trois rangées conjuguées, toutes les directions possibles de plans réticulaires seront données, si l'on joint un nœud quelconque de l'une des rangées avec deux nœuds arbitrairement choisis sur les deux autres. En effet, un plan réticulaire ayant pour caractéristiques trois nombres entiers, q, r, s, ses intersections avec les trois axes sont à des distances de l'origine relativement proportionnelles à $\frac{a}{q}, \frac{b}{r}, \frac{c}{s}$. Or, si l'on considère le nœud situé sur Ox à une distance de O marquée par $\frac{qrs}{q} \times a$ ou $rs \times a$, le nœud situé sur Oy en $\frac{qrs}{r} \times b$ ou $qs \times b$ et le nœud situé sur Oz en $\frac{qrs}{s} \times c$ ou $qr \times c$, on a

$$\frac{rs.a}{qs.b} = \frac{r.a}{q.b} = \frac{\frac{1}{q}.a}{\frac{1}{r}.b}.$$

Donc les trois longueurs rsa, qsb, qrc sont entre elles comme les longueurs $\frac{a}{q}, \frac{b}{r}, \frac{c}{s}$. Par suite, le plan réticulaire défini par les trois points (rs, 0, 0), (0, qs, 0), (0, 0, qr) est parallèle au plan donné. Donc à toute direction admis-

sible de plan réticulaire correspond certainement un plan parallèle, mené par trois nœuds pris sur les trois rangées.

En opérant ainsi la jonction de trois nœuds, on forme un tétraèdre, qui a pour sommet l'origine et pour base un triangle constitué par trois rangées, contenues l'une dans le plan des xy, la seconde dans le plan des xz et la troisième dans le plan des yz. Or si, par l'origine, qui est un nœud, on mène des parallèles à ces trois rangées, les lignes ainsi obtenues devront être elles-mêmes des rangées et d'eux d'entre elles suffiront à définir la direction du plan réticulaire. On peut donc dire que toutes les directions de plans admissibles, dans un assemblage, seront données par la combinaison de deux rangées issues de l'origine et respectivement contenues dans deux des plans coordonnés.

Il suit de là que l'*intersection de deux plans réticulaires est toujours parallèle à une rangée*. En effet, choisissons l'un de ces plans pour plan des xy. Il suffira, pour définir l'assemblage, d'y joindre deux plans conjugués. Cela posé, l'intersection du plan des xy avec le second plan donné servira à définir la direction, dans xy, d'un plan réticulaire et, toutes les directions de ce genre devant être marquées par des rangées issues de l'origine, il suit de là que l'intersection en question ne peut avoir d'autre direction que celle d'une rangée.

Remarquons maintenant que, si la considération des trois rangées conjuguées ou, ce qui revient au même, des trois plans réticulaires conjugués, suffit à indiquer *toutes les directions de plans admissibles*, elle est bien loin de donner *tous les plans*; car à chaque direction trouvée correspond un plan parallèle, mené par chaque nœud.

Cherchons la condition pour qu'un plan réticulaire (qrs), passant par l'origine, soit conjugué d'une rangée (mnp), également issue de l'origine. Il faut et il suffit que le nœud mnp, limitrophe de l'origine, appartienne à l'un des deux plans limitrophes de (qrs). Or l'équation de (qrs) étant

$$q\frac{x}{a}+r\frac{y}{b}+s\frac{z}{c}=0,$$

celle des deux plans limitrophes est

$$q\frac{x}{a}+r\frac{y}{b}+s\frac{z}{c}=\pm 1.$$

En remplaçant $\frac{x}{a}$, $\frac{y}{b}$ et $\frac{z}{c}$ par leurs valeurs m, n, p, pour exprimer que le nœud mnp satisfait à la condition indiquée, on trouve

$$qm+rn+sp=\pm 1.$$

Formules des zones. — On appelle *zone*, en cristallographie, l'ensemble de toutes les faces parallèles à une même direction. Ces faces, convenablement prolongées, constituent, par leurs rencontres deux à deux, un prisme indéfini,

à section polygonale, dont les arêtes parallèles entre elles définissent la direction de ce qu'on nomme l'*axe de zone*. L'utilité de la considération des zones, en Minéralogie, est indéniable, si l'on se rappelle que les angles dièdres des faces se mesurent, en général, à l'aide du goniomètre à réflexion. Pour faire cette mesure, on dispose le cristal de telle sorte que l'intersection des deux faces réfléchissantes, dont on veut déterminer l'angle, coïncide avec une normale au disque gradué, menée dans le voisinage du centre, et on le fait tourner ensuite jusqu'à ce qu'on ait successivement reçu dans l'œil les deux images d'un objet, réfléchi par ces faces. Il résulte de là que, si un cristal possède plusieurs faces parallèles à une même direction, il suffira d'avoir placé deux d'entre elles dans les conditions exigées par la mesure, pour que toutes les autres, après des rotations convenables, réfléchissent à leur tour l'objet visé. On constate alors, suivant l'expression consacrée, que ces diverses faces *sont en zone*.

Les zones cristallines abondent dans la nature; on le reconnaît à ce que les facettes d'un cristal complexe ont généralement leurs arêtes opposées parallèles, ce qui prouve qu'elles forment zone avec les deux faces adjacentes, qu'elles coupent suivant les arêtes en question.

Or si l'on a pu constater, par des expériences goniométriques, qu'une face nouvelle faisait partie de deux zones différentes déjà connues, cette face est absolument déterminée en direction, puisque, appartenant aux deux zones, elle est parallèle à la fois aux deux axes de ces zones et qu'un plan est défini par la condition d'être parallèle à deux droites données. On conçoit donc qu'il ne soit pas nécessaire de mesurer les inclinaisons de cette face sur celles dont la notation a déjà été déterminée et qu'une simple formule doive suffire pour trouver son *symbole* géométrique ou algébrique, à l'aide de ceux des zones auxquelles elle appartient. Soient (qrs), $(q'r's')$, les caractéristiques de deux plans servant à définir une zone et passant tous deux par l'origine. Les équations de ces plans seront

$$(1)\quad q\frac{x}{a}+r\frac{y}{b}+s\frac{z}{c}=0, \qquad (2)\quad q'\frac{x}{a}+r'\frac{y}{b}+s'\frac{z}{c}=0.$$

Par conséquent, les équations de l'axe de zone seront

$$\frac{x}{a}\cdot\frac{1}{rs'-sr'}=\frac{y}{b}\cdot\frac{1}{sq'-qs'}=\frac{z}{c}\cdot\frac{1}{qr'-rq'},$$

ainsi qu'on peut s'en assurer en éliminant successivement une des deux variables entre les équations (1) et (2).

Les caractéristiques de l'axe de zone sont donc :

$$rs'-sr', \quad sq'-qs', \quad qr'-rq'.$$

Il est facile de former ces binômes immédiatement, à l'aide de la règle sui-

vante : On écrit deux fois qrs sur une même ligne et, exactement par-dessous, deux fois $q'r's'$. On isole par une barre verticale la colonne de gauche et celle de droite, puis on place le signe $\times$ dans les intervalles des quatre colonnes restantes.

$$\begin{array}{c|cccc|c} q & r & s & q & r & s \\ q' & r' & s' & q' & r' & s' \end{array}$$

Ce signe indique que pour former, par exemple, le premier binôme, il faut multiplier r par s' et en retrancher le produit de s par r'. Le second sera le produit de s par q', diminué du produit de q par s', etc.

La condition pour qu'un plan (qrs) fasse partie d'une zone (MNP) est facile à trouver ; en effet, les équations de l'axe de zone sont

$$\frac{\frac{x}{a}}{\mathrm{M}} = \frac{\frac{y}{b}}{\mathrm{N}} = \frac{\frac{z}{c}}{\mathrm{P}}.$$

D'ailleurs, le plan a pour équation

$$q\frac{x}{a} + r\frac{y}{b} + s\frac{z}{c} = 0.$$

Remplaçant $\frac{x}{a}, \frac{y}{b}, \frac{z}{c}$ par les valeurs proportionnelles M, N, P, on obtient

$$\mathrm{M}q + \mathrm{N}r + \mathrm{P}s = 0.$$

Ainsi le plan des xy, dont le symbole est (001), fait partie de la zone qui a pour axe l'axe des x ou (100), car, dans ce cas, le produit $\mathrm{M}q + \mathrm{N}r + \mathrm{P}s$ devient $1 \times 0 + 0 \times 0 + 0 \times 1$ et l'on voit qu'il est bien égal à zéro.

Enfin soient MNP, M'N'P' deux axes de zones. Si un plan (qrs) appartient à la fois aux deux zones, on devra avoir simultanément

$$\mathrm{M}q + \mathrm{N}r + \mathrm{P}s = 0, \quad \mathrm{M}'q + \mathrm{N}'r + \mathrm{P}'s = 0 ;$$

on en déduit

$$\frac{q}{\mathrm{NP}' - \mathrm{PN}'} = \frac{r}{\mathrm{PM}' - \mathrm{MP}'} = \frac{s}{\mathrm{MN}' - \mathrm{NM}'}.$$

Ainsi les caractéristiques q, r, s s'obtiennent par une simple formule, aisée à retrouver, et le symbole de la face est absolument déterminé, sans qu'aucune mesure d'angles soit nécessaire, par cela seul qu'on a reconnu, à l'aide du goniomètre à réflexion, que cette face faisait partie à la fois de deux zones déjà définies.

Aire de la maille d'un plan réticulaire. — Nous avons dit qu'une face cristalline avait, toutes choses égales d'ailleurs, d'autant plus de chances de se produire que la densité réticulaire était plus grande suivant la direction de cette face. A ce point de vue, il n'est pas sans intérêt de savoir calculer la

densité réticulaire d'un plan, ou, ce qui revient au même, la surface de la *maille* dans ce plan. Nous nous bornerons à examiner le cas (d'ailleurs le plus fréquent) où les axes conjugués forment un système trirectangulaire.

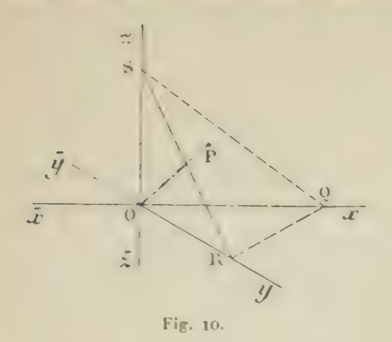


Fig. 10.

Soient (fig. 10) Ox, Oy, Oz les trois axes conjugués, ayant pour paramètres a, b, c. Supposons qu'il s'agisse de déterminer la surface de la maille d'un plan (qrs). Parmi tous les plans parallèles compris dans ce symbole, choisissons celui qui est limitrophe de l'origine et qui coupe les trois axes en Q, R, S, de telle sorte que

$$\mathrm{OQ} = \frac{1}{q}.a, \quad \mathrm{OR} = \frac{1}{r}.b, \quad \mathrm{OS} = \frac{1}{r}.c.$$

Commençons par évaluer l'aire du triangle rectangle OQR. On a :

$$\text{Surf. OQR} = \frac{1}{2}\,\mathrm{OQ} \times \mathrm{OR} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{qr}.ab.$$

Mais ab est justement l'aire de la maille élémentaire du plan xy ou (001). On peut donc écrire :

$$(1) \qquad \text{Surf. OQK} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\text{surf. (001)}}{qr}.$$

D'autre part, si de O on abaisse OP, perpendiculaire sur QRS, le produit de O par surf. QRS sera égal à trois fois le volume de la pyramide OQRS. Mais ce volume est aussi égal au tiers du produit de surf. OQR par la longueur OS ou $\frac{1}{s}c$. Donc

$$(2) \qquad \frac{1}{s}c. \times \frac{1}{2}\frac{\text{surf. (001)}}{qr} = \text{OP surf. QRS}.$$

Cela posé, le plan (qrs) étant limitrophe de l'origine, le produit de OP par la surface de la maille ou surf. (qrs) est égal au volume Ω du noyau. Mais ce volume est aussi égal, par exemple, au produit du paramètre c par la maille de xy ou surf. (001).

C'est-à-dire qu'on a :

$$\text{OP surf. }(qrs) = c \text{ surf. (001)}.$$

Remplaçant OP par sa valeur dans l'équation (2), on obtient :

$$(3) \qquad \frac{\text{surf. QRS}}{\text{surf. }(qrs)} = \frac{1}{2.qrs}.$$

Maintenant, d'après un théorème connu de géométrie analytique, on a :

$$\left[\text{surf. QRS}\right]^2 = \left[\text{surf. OQR}\right]^2 + \left[\text{surf. OQS}\right]^2 + \left[\text{surf. ORS}\right]^2.$$

Chacune des surfaces du second membre est donnée par la formule (1), avec changement convenable des lettres et des chiffres. D'ailleurs, en vertu de l'équation (3), on a :

$$\left[\text{surf. } (qrs)\right]^2 = 4 q^2 r^2 s^2 \left[\text{surf. QRS}\right]^2.$$

En substituant, il vient :

$$\left[\text{surf. } (qrs)\right]^2 = q^2 \left[\text{surf. } (100)\right]^2 + r^2 \left[\text{surf. } (010)\right]^2 + s^2 \left[\text{surf. } (001)\right]^2.$$

§ 4

LOIS DES TRONCATURES RATIONNELLES ET DES ZONES

Avant que le principe de la constitution réticulaire des milieux cristallisés eût été posé par Delafosse et Bravais, on avait coutume de donner pour base, à la théorie cristallographique, soit la *loi des indices rationnels*, découverte par Haüy, soit la *loi des zones*, formulée par Weiss. Il importe de démontrer que ces deux lois, expressions diverses d'un même fait, sont contenues, l'une et l'autre, dans le principe des assemblages réticulaires.

Principe des troncatures. — L'esprit perspicace d'Haüy n'avait pas hésité à reconnaître que la symétrie parallélépipédique se retrouve au fond de toute forme cristalline. Pour lui, un cristal quelconque était toujours le résultat de modifications apportées à une *forme primitive prismatique*, c'est-à-dire parallélépipédique, par voie de *troncatures* opérées sur les angles ou sur les arêtes. Ainsi, soit ABCDEFGH (fig. 11) le parallélépipède primitif d'une espèce minérale donnée. Toute face non parallèle aux faces de ce prisme fondamental peut être conçue, dans le cas le plus général, comme venant *tronquer* l'angle A. Peu importe d'ailleurs à quelle distance du point A

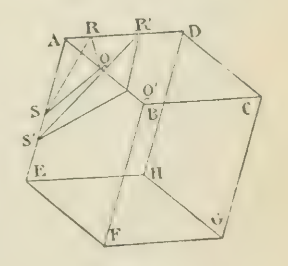


Fig. 11.

cette troncature sera placée, les faces d'un cristal n'étant définies que par leur direction et non par leur position absolue. Si donc QRS est la troncature en question, sa direction sera entièrement définie par les rapports mutuels des longueurs AQ, AR, AS, ou, ce qui revient au même, par les valeurs relatives des rapports $\frac{AQ}{AB}$, $\frac{AR}{AD}$, $\frac{AS}{AE}$, les trois arêtes AB, AD, AE étant les trois *para-*

mètres a, b, c, qui servent, par leurs directions et leurs grandeurs, à définir entièrement la forme fondamentale.

Posons

$$AQ = \frac{1}{q}.AB, \qquad AR = \frac{1}{r}.AD, \qquad AS = \frac{1}{s}.AE,$$

q, r, s, étant trois nombres quelconques, qui serviront à définir la troncature. Une autre face, Q′R′S′, non parallèle à la première, sera définie à son tour par trois nombres, q', r', s', si l'on pose

$$AQ' = \frac{1}{q'}.AB, \qquad AR' = \frac{1}{r'}.AD, \qquad AS' = \frac{1}{s'}.AE.$$

Or l'observation avait conduit Haüy à reconnaître que les rapports $\frac{AQ}{AQ'}$, $\frac{AR}{AR'}$, $\frac{AS}{AS'}$, c'est-à-dire $\frac{q}{q'}$, $\frac{r}{r'}$, $\frac{s}{s'}$, sont toujours rationnels et généralement exprimés par des nombres simples.

Si, d'ailleurs, pour définir les longueurs AB, AD, AE des arêtes du prisme, on se sert précisément de l'une de ces faces, par exemple de $q'r's'$ (ce qui revient à admettre AQ′ = AB, AR′ = AD, AS′ = AE), les rapports précédents deviennent $\frac{1}{q}$, $\frac{1}{r}$, $\frac{1}{s}$, et portent le nom d'*indices* de la face ou troncature QRS. Ainsi les faces d'un cristal sont caractérisées par ce fait, que les indices numériques qui servent à les définir sont *toujours rationnels et généralement simples*. Telle est la loi des *indices rationnels*, établie par Haüy pour les trois arêtes du prisme fondamental, et étendue depuis à tout système de trois axes cristallographiques, c'est-à-dire de trois arêtes cristallines qui divergent d'un même point.

Explication de la rationnalité et de la simplicité des indices. — Nous avons vu que cette propriété découlait nécessairement du fait que les caractéristiques des rangées et des plans réticulaires étaient des nombres entiers. La loi des *indices rationnels* nous apparaît donc comme la traduction de la constitution réticulaire des cristaux.

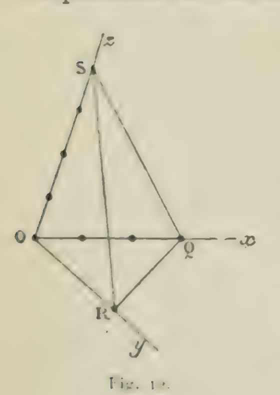


Fig. 12.

On peut encore le faire voir d'une façon très simple, en utilisant une propriété déjà démontrée des assemblages. En effet nous savons qu'un assemblage est entièrement défini par les directions et les paramètres *a, b, c,* de trois rangées conjuguées Ox, Oy, Oz (fig. 11), et qu'il n'existe dans cet assemblage d'autres directions de plans réticulaires, c'est-à-dire de faces cristallines possibles, que celles obtenues par la jonction d'un nœud quelconque de Ox avec deux nœuds arbitrairement choisis sur Oy et Oz. Soit donc QRS un plan réti-

culaire quelconque. L'intervalle OQ représente évidemment *un nombre entier de fois le paramètre a*. On peut donc poser $OQ = ma$, m étant un nombre entier. De même on aura $OR = nb$, $OS = pc$. Ainsi la face QRS peut être définie en direction par les trois nombres entiers m, n et p. Une autre face étant définie par trois autres nombres entiers m', n', p', il est évident que les rapports $\frac{OQ'}{OQ}, \frac{OR'}{OR}, \frac{OS'}{OS}$, respectivement égaux à $\frac{m'}{m}, \frac{n'}{n}, \frac{p'}{p}$, seront rationnels, puisque ces fractions ont leurs deux termes formés par des nombres entiers.

En outre, ces rapports seront généralement *simples*. En effet, nous savons qu'un plan (qrs) coupe les axes conjugués à des distances de l'origine définies par $\frac{1}{q}, \frac{1}{r}, \frac{1}{s}$. Mais ces mêmes distances, pour les plans QRS, Q'R'S', sont aussi définies par m, n, p, m', n', p'.

Donc, les rapports $\frac{m}{m'}, \frac{n}{n'}, \frac{p}{p'}$ équivalent aux rapports $\frac{q}{q'}, \frac{r}{r'}, \frac{s}{s'}$.

Cela posé, en vertu de la formule analytique (1) qui donne la surface de la maille d'un plan réticulaire en fonction des caractéristiques q, r, s, la maille en question est d'autant plus grande que q, r et s ont des valeurs plus fortes. Et comme nous avons montré que les plans cristallographiques les plus aptes à se produire étaient ceux de plus grande densité réticulaire, il en résulte que les faces qui ont le plus de chances de naître sont celles pour lesquelles les caractéristiques ont la moindre valeur, auquel cas les rapports $\frac{q}{q'}, \frac{r}{r'}, \frac{s}{s'}$ sont nécessairement simples.

En résumé, il est permis de dire qu'au fond il y a identité entre la loi des indices rationnels et le principe des assemblages réticulaires, les trois arêtes du prisme fondamental n'étant autre chose que celles du parallélépipède générateur.

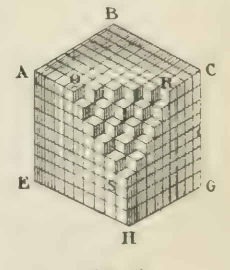


Fig. 13.

Décroissements d'Haüy. — Il est bon de rappeler qu'Haüy ne s'était pas borné à formuler, comme un résultat d'expérience, la loi des troncatures rationnelles. Il en avait donné une raison physique ingénieuse, très analogue à celle que nous a fournie la considération des rangées conjuguées. Pour le fondateur de la Cristallographie, un prisme naturel était composé de petits prismes semblables et régulièrement juxtaposés, constituant des *rangées de particules intégrantes*, susceptibles d'ailleurs d'être isolées par le clivage.

Cela étant, pour faire naître, sur l'angle D d'un prisme ABCDEFGH, une troncature QRS (fig. 13), il suffisait d'enlever, à partir de chacune des arêtes aboutissant en D, des rangées de particules en nombre décroissant. On obtenait ainsi une troncature en escalier et, en attribuant aux prismes élémentaires des

(1) Voir dans Mallard, *Traité de Cristallographie*, p. 22, l'extension de cette formule au cas où les axes conjugués ne sont pas à angle droit.

dimensions excessivement petites, on pouvait admettre que l'impression physique résultante serait celle d'une face plane, menée par les points Q, R et S. Par conséquent, les longueurs DQ, DR, DS étant définies par un nombre entier de paramètres (en prenant pour paramètres les dimensions respectives des petits prismes), leurs rapports avec les longueurs DQ', DR', DS', relatives à toute autre troncature, ne pouvaient être que rationnels. On voit que, par cette *loi des décroissements*, Haüy était arrivé bien près du principe des réseaux. Le seul tort de l'hypothèse serait d'attribuer une réalité objective à ces parallélépipèdes qui, pour nous, ne sont plus que des figures géométriques, dont les sommets portent des points matériels homologues. Sans doute Haüy n'était pas tombé dans cette erreur, comme le prouve une phrase écrite par lui en 1822; mais l'expression défectueuse de *molécules intégrantes* a pu accréditer le malentendu, jusqu'au jour où la notion des réseaux a été explicitement énoncée par Delafosse.

Loi des zones. — A la loi des troncatures rationnelles, les cristallographes allemands ont voulu substituer la *loi des zones*, formulée au commencement du XIXe siècle par Weiss et présentée, dans les traités d'outre-Rhin, comme plus générale que celle d'Haüy. On se rappelle que le nom de zone désigne l'ensemble de toutes les faces cristallines parallèles à une même direction, appelée *axe* de la zone. Cela posé, l'observation démontre que, sur un cristal, les facettes adventives ont le plus souvent leurs côtés opposés parallèles. Par exemple, dans un cristal de quartz (fig. 14), on voit fréquemment des facettes, telles que ABCD, CDEF, dans lesquelles les côtés AB, CD et EF sont parallèles, ce qui indique évidemment que ces facettes sont parallèles à l'intersection mutuelle des faces M et N, de même que CDEF, par suite du parallélisme de CE et de DF, est parallèle à l'intersection des faces P et Q. De cette manière, la face adventive CDEF fait partie à la fois des deux zones (M, N), (P, Q), ce qui la détermine entièrement et permet d'établir, sans mesure préalable, son symbole en fonction de ceux des faces existantes. Il semble donc que la production de la facette ait été *commandée*, en quelque sorte, par l'existence des deux zones antérieurement reconnues. En généralisant cette observation, on est conduit à penser que les intersections des faces, combinées deux à deux, indiquent toutes des directions de faces admissibles dans la série soumise à l'observation. Dès lors, pour que cette série soit connue tout entière, il suffit qu'on en ait préalablement déterminé deux zones indépendantes. En effet, appelons 1, 2, 3, 4 les quatre faces qui définissent les deux zones indépendantes. L'axe de la zone 1-2, combiné avec celui de la zone 3-4, donne une face cristallographiquement possible, que nous appellerons 5. D'autre part, en combinant 1 avec 3 et 2 avec 4, on obtient deux nouveaux axes 1-3, 2-4, qui définissent aussi une face possible 6. A leur tour, 5 et 6 forment une nou-

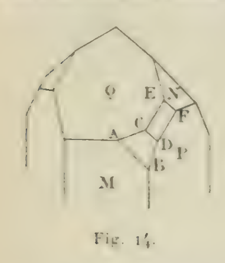


Fig. 14.

velle zone, qui, combinée avec celles des précédentes dont elle ne dépend pas, fournit de nouvelles faces et ainsi de suite. De cette manière et en partant de ce principe, que la combinaison de deux arêtes cristallines engendre toujours une face possible, la connaissance de quatre faces, en deux zones distinctes, suffit à en faire connaître par dérivation une infinité d'autres, ce que Weiss a exprimé par la loi suivante :

Dans le développement progressif des différents termes d'une série cristalline, chaque terme est déterminé par les zones que forment entre eux les termes précédents.

Tel est l'énoncé que la science allemande a préféré à celui d'Haüy, comme offrant une plus grande généralité. Nous allons voir pourtant que, sous sa forme quelque peu abstraite, il n'est, comme la loi des troncatures, qu'une simple interprétation du grand fait de la structure réticulaire.

Traduction de la loi des zones. — En premier lieu, dire que deux zones déjà connues déterminent, par la combinaison de leurs axes, une face cristallographiquement possible, c'est dire que, par deux *arêtes* existantes, transportées au même point, on peut toujours faire passer un plan cristallin. Or si, comme cela a lieu dans la conception réticulaire, les arêtes cristallines sont des *rangées*, la chose est évidente, puisque deux rangées définissent toujours un plan réticulaire possible.

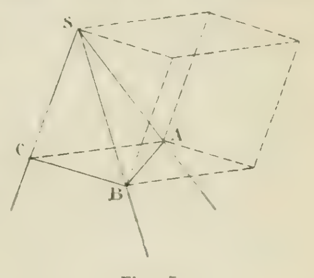


Fig. 15.

Mais allons plus loin. Les deux zones indépendantes étant définies par quatre faces, il nous est loisible de faire passer trois de ces faces par un même point S (fig. 15), et de placer la quatrième dans l'intérieur du trièdre ainsi formé, en ABC. Or cette figure SABC n'est autre chose qu'un tétraèdre, que nous pouvons regerder comme le *tétraèdre générateur* d'un assemblage réticulaire dont, par suite, tous les éléments se trouvent ainsi déterminés. En construisant, sur ce tétraèdre, le réseau parallélépipédique correspondant, nous aurons, par des jonctions successives opérées entre les nœuds pris trois à trois, toutes les directions de plans cristallographiquement admissibles, chacun de ces plans formant zone avec deux des plans précédemment déterminés.

En résumé, la loi des zones, revenant à dire que quatre faces suffisent à en déterminer une infinité d'autres, coordonnées au même système, ne fait que traduire, sous une forme spéciale, la nécessité d'un parallélépipède générateur, dont les zones prismatiques fondamentales sont définies par trois des faces données, tandis que la quatrième sert à fixer les dimensions relatives des arêtes. Par conséquent cette loi est identique, dans son essence, avec le principe réticulaire, qui lui-même ne diffère pas de la loi des troncatures rationnelles.

CHAPITRE II

PRINCIPES DE LA SYMÉTRIE CRISTALLINE

§ 1

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA SYMÉTRIE DES POLYÈDRES

Principe de la recherche. — Un cristal étant un assemblage de particules, soumises à la loi de la disposition réticulaire, si l'on veut savoir de combien de variétés la structure cristalline est susceptible, il suffit de déterminer le nombre et la nature des combinaisons que peuvent offrir les systèmes parallélépipédiques. Pour faire cette recherche avec fruit, il convient de se souvenir que la propriété essentielle de la matière cristalline est *la symétrie de sa disposition*. Définir rigoureusement cette notion de la symétrie, pour déterminer ensuite les divers modes sous lesquels elle peut se manifester, telle doit être notre première préoccupation.

Un assemblage se compose de trois sortes d'éléments : les *nœuds*, tous identiques entre eux ; les *rangées*, qui peuvent différer par la valeur de leur paramètre ; enfin les *plans réticulaires*, dont chacun est caractérisé par l'aire de sa maille, ainsi que par les directions et les grandeurs des deux plus petits paramètres qui servent à définir cette maille. Cela posé, tandis que les rangées de même direction ont toujours le même paramètre et que les plans parallèles sont identiques entre eux, en général, les paramètres des rangées diffèrent avec les directions et les plans non parallèles n'ont pas les mêmes éléments caractéristiques. Cependant il peut arriver que des rangées ou des plans de directions différentes soient identiques et puissent être substitués les uns aux autres par un simple mouvement de l'ensemble. Plus ce cas est fréquent et plus le système correspondant est dit *symétrique*.

On conçoit sans peine l'importance de cette notion. Deux plans réticulaires capables d'être substitués l'un à l'autre sont dans les mêmes conditions relativement à l'ensemble du milieu cristallin. Ils ont donc autant de chances l'un que l'autre de se produire dans l'acte de la cristallisation. Par conséquent, une forme cristalline se montrera d'autant plus riche en facettes, que le système auquel elle appartient sera mieux pourvu d'éléments de symétrie.

C'est exactement ce qu'Haüy avait reconnu lorsqu'il formulait sa *loi de symétrie*, ainsi conçue : « Quand une forme cristalline se modifie, la modification se répète de la même manière et produit le même effet sur toutes les parties extérieures de la forme (faces, angles ou arêtes), qui sont de même espèce et identiques entre elles au point de vue géométrique. » Seulement, pour donner à

cette définition des éléments identiques une rigueur suffisante, au lieu de procéder à une classification plus ou moins arbitraire des solides prismatiques, nous donnerons, avec Bravais, pour base à cette recherche, l'étude des conditions générales de la symétrie.

D'ailleurs les assemblages réticulaires ne sont qu'une espèce particulière de *polyèdres géométriques*, c'est-à-dire de solides définis par des points ou sommets, entre lesquels on imagine des lignes et des surfaces. Il conviendra donc d'établir avant tout les lois de la symétrie des polyèdres, après quoi il y aura lieu de préciser les restrictions que ces lois comportent, quand on impose aux polyèdres la condition de présenter une disposition réticulaire.

Définition des éléments de symétrie. — La symétrie dans les polyèdres se définit à l'aide des *centres*, des *plans* et des *axes*.

Un *centre de symétrie* est un point tel, que tous les sommets du polyèdre considéré soient distribués, deux à deux, sur des lignes droites passant par ce point et à égale distance de part et d'autre.

Un *plan de symétrie* est un plan qui partage le polyèdre de telle façon, que les sommets soient situés deux à deux sur des perpendiculaires à ce plan et à égale distance de part et d'autre du plan.

Enfin un *axe de symétrie* est une ligne telle que, si l'on imprime au polyèdre, autour de cette ligne, une rotation d'amplitude déterminée, tous les sommets de ce polyèdre se trouvent simplement substitués les uns aux autres, continuant à occuper les mêmes lieux de l'espace. L'axe est dit *d'ordre n*, lorsque la rotation par laquelle s'opère la substitution des sommets est égale à $\frac{2\pi}{n}$. Ainsi une rotation de $\frac{2\pi}{2} = 180°$ détermine un axe d'ordre 2 ou *binaire*. A une rotation de $\frac{2\pi}{3}$ ou 120° correspond un axe d'ordre 3 ou *ternaire*, etc.

Relations mutuelles des éléments de symétrie. — *Lorsqu'un polyèdre possède ensemble plusieurs axes ou plusieurs plans de symétrie, ces axes et ces plans doivent se couper en un même point.* En effet, si l'on considère tous les sommets du polyèdre comme des points matériels également pesants, il est clair que le centre de gravité devra se trouver à la fois sur tous les axes et sur tous les plans de symétrie. Donc ces axes et ces plans doivent avoir un point d'intersection commun, qui est ce centre de gravité.

Lorsqu'un polyèdre possède un centre de symétrie, l'existence d'un plan de symétrie implique celle d'un axe d'ordre pair et réciproquement. D'abord il est clair que le centre de symétrie, qui coïncide avec le centre de gravité, doit se trouver sur le plan de symétrie. Soient donc (fig. 16) O le centre, P le plan donné et A un sommet quelconque du polyèdre. Si, de A, nous abaissons AC perpendiculaire sur P et que nous prolongions cette ligne d'une longueur égale CA_1, nous sommes sûrs de rencontrer en A_1 un sommet du polyèdre. Il en sera de même si nous joignons AO et que nous prolongions cette ligne d'une quantité

égale OA. Du point A, abaissons AD perpendiculaire sur P et prolongeons d'une quantité égale A'_1 D. A'_1 sera encore un des sommets du polyèdre. Or si nous joignons AA'_1, A_1 A', A_1 A'_1, il est clair que nous obtiendrons un rectangle perpendiculaire au plan P, et dans lequel les lignes AA'_1 et A_1 A', parallèles à ce plan, sont de longueur égale à CD. Si donc, par le centre O, nous menons une ligne LL' normale à P, cette ligne sera contenue dans le rectangle et partagera les lignes AA'_1 et A_1 A', auxquelles elle sera perpendiculaire, en deux parties égales. Donc, si l'on fait tourner le polyèdre de 180° autour de LL', on ne fera que substituer le sommet A au sommet A'_1, et comme la même chose aura lieu pour tous les sommets, la ligne LL' sera, pour le polyèdre, *un axe au moins binaire.*

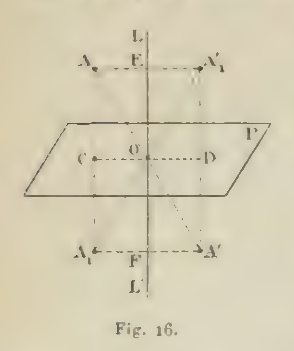


Fig. 16.

D'ailleurs la démonstration peut être présentée en ordre exactement inverse, ce qui permet d'établir la réciproque. Ainsi, partout où il y a un centre, l'existence des plans de symétrie et celle des axes binaires normaux sont intimement liées.

Intersections et angles des plans de symétrie et des axes binaires. — Quand, dans un polyèdre, il y a plusieurs plans de symétrie, nous savons que ces plans doivent tous se couper au même point. Mais leurs intersections deux à deux sont des lignes droites qui, pourvu qu'elles passent en ce point, peuvent différer de position. Cela posé, on peut établir que *si, dans un polyèdre, plusieurs plans de symétrie se coupent suivant une même ligne droite, l'angle de deux plans consécutifs est constant et égal à* $\frac{\pi}{n}$, n *étant le nombre des plans.*

Pour le démontrer, projetons (fig. 17) les divers plans sur un plan perpendiculaire à leur intersection commune, qui s'y projette en O. Soit OS et OT ceux de ces plans qui font entre eux *le plus petit angle,* que nous appellerons α. Ces deux plans, remarquons-le bien, quoique plans de symétrie l'un et l'autre, peuvent n'être pas identiques quant à la répartition des sommets autour de chacun d'eux. Mais l'existence du plan OT entraîne l'existence du plan OS', identique avec OS et faisant, à droite de OT, l'angle α. A son tour, OS' nécessite un plan OT', identique avec OT et séparé de OS' par le même intervalle angulaire α. En continuant ainsi, on finira par arriver à un plan OX, qui ne peut faire avec OS_1, prolongement de OS, un angle différent de α; car, par hypothèse, cet angle ne peut pas être plus petit et, s'il était plus grand, cela signifierait qu'on n'a pas épuisé la série des répétitions. Donc XOS_1 est égal à α, et les divers plans, au nombre de *n*, font entre eux des angles tels que $n\alpha = \pi$. En général, *n* est un nombre entier fini; mais, dans le cas d'un solide de révolution, il peut être infini.

Remarquons maintenant que, pour une rotation de α, ou de 3α, ou, en général, de $(2p+1)\alpha$, c'est toujours un plan identique avec T que l'on obtient. Si donc n est impair, le dernier plan obtenu, qui doit être un plan T, se trouvant en coïncidence avec un plan S, il faut que les plans S et T soient identiques. Le polyèdre ne comporte donc, se coupant suivant O, qu'*une seule catégorie de plans de symétrie.* Au contraire, si n est pair, c'est toujours un plan S qui revient, après une rotation de 180°, en coïncidence avec le plan SS_1. Donc, dans ce cas, il peut y avoir *deux espèces de plans de symétrie.*

En tout cas, soit M un sommet du polyèdre, dont M′ est le symétrique relativement à OS. M′ aura, relativement à OT, son symétrique M_1, lequel se répétera en M'_1 relativement à OS. Il est d'ailleurs facile de voir que l'angle MOM_1 est égal à 2α, puisque MOS est égal à M_1OS'. De même $M'OM'_1 = 2\alpha$. Donc, à tout sommet M correspond son symétrique M_1, obtenu par une rotation de $2\alpha = \frac{2\pi}{n}$ autour de l'axe O. Donc la ligne projetée en O est un axe d'ordre n. Ainsi, *dans tout polyèdre, la ligne d'intersection commune de* n *plans de symétrie est un axe d'ordre* n.

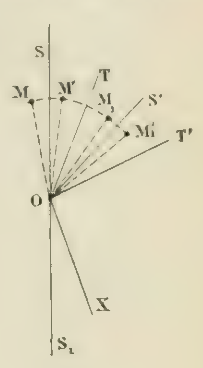


Fig. 17.

L'existence, dans un polyèdre, d'un axe d'ordre n, n'implique pas nécessairement celle de n plans de symétrie se coupant suivant cet axe. Mais, s'il en existe un, il doit y en avoir n en tout. En effet, revenons à la figure 16. Soit S un plan de symétrie passant par l'axe O. Un sommet quelconque M exige, relativement à S, son symétrique M′ et ces deux sommets en vertu de l'axe O, se répètent en M_1 et M'_1, à des distances angulaires de M et de M′ égales à $\frac{2\pi}{n}$. Or il est aisé de voir que la ligne OT, bissectrice de $M'OM_1$ et la ligne OS′, bissectrice de $M_1OM'_1$ sont les traces de deux plans, relativement auxquels tous les sommets sont symétriquement distribués et que, de plus, chaque angle tel que SOT est égal à $\frac{\pi}{n}$.

A l'aide d'une démonstration identique, on ferait voir que *si, dans un polyèdre, il y a* n *axes binaires situés dans un même plan, auquel cas on sait que ces axes concourent au même point, deux axes consécutifs font un angle constant, égal à* $\frac{\pi}{n}$. De plus, si n est pair, il peut y avoir deux sortes d'axes, tandis qu'il n'y en a qu'une seule quand n est impair.

Relation des axes binaires et des axes multiples. — *Lorsqu'un polyèdre possède* n *axes binaires dans un même plan, il possède en outre un axe d'ordre* n *perpendiculaire à ce plan.*

Considérons (fig. 18) deux axes binaires consécutifs, OL_1, OL_2, vus en perspective et faisant entre eux un angle L_1OL_2 égal à $\frac{\pi}{n}$. Soit S un sommet quel-

conque du polyèdre. En menant SA perpendiculaire à OL_1 et prolongeant d'une quantité égale AS_1, on est sûr de trouver en S_1 un autre sommet ; car une rotation de 180° autour de OL_1 amène S en S_1. De même, si S_1B est perpendiculaire à OL_2 et que BS_2 soit égal à BS_1, S_2 sera aussi un sommet du polyèdre. Des trois points S, S_1, S_2, abaissons, sur le plan L_1OL_2, les trois perpendiculaires Ss, S_1s_1, S_2s_2. Le plan qui passe par SS_1, Ss et S_1s_1 contiendrait aussi la perpendiculaire à OL_1, menée par A normalement au plan L_1OL_2. Comme d'ailleurs SS_1 est aussi perpendiculaire à OL_1, le plan en question est normal à l'axe binaire OL_1 et coupe le plan L_1OL_2 suivant une ligne ss_1, qui passe par A et qui est perpendiculaire à OL_1. D'ailleurs, dans les triangles rectangles égaux SAs, S_1As_1, $sA = s_1A$. Donc, dans les triangles rectangles OsA, Os_1A, l'angle sOA est égal à l'angle s_1OA. On verrait de même que $s_1OB = s_2OB$. Donc l'angle s_2Os est le double de l'angle L_1OL_2, c'est-à-dire qu'il est égal à $\frac{2\pi}{n}$. D'autre part, si par S et S_2 on mène deux droites parallèles à sO et s_2O, ces deux lignes se couperont en O′, sur une ligne menée par le point O normalement au plan des axes binaires, et on aura $SO'S_2 = sOs = \frac{2\pi}{n}$. Par conséquent tout sommet tel que S se substituera à un autre S_2 par une rotation de $\frac{2\pi}{n}$ autour de OO′. Donc OO′ est un axe d'ordre *n*.

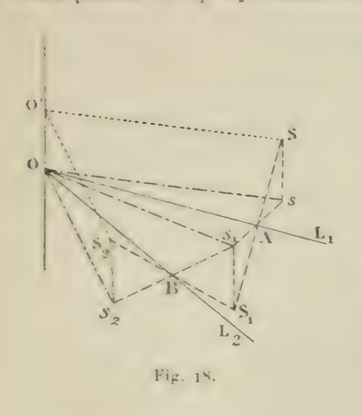


Fig. 18.

La même démonstration retournée servirait à établir que *si, perpendiculairement à un axe d'ordre* n, *il existe un axe binaire, il doit y en avoir* n *en tout.*

§ 2

SYMÉTRIE DES ASSEMBLAGES RÉTICULAIRES

Éléments de symétrie des assemblages. — Les théorèmes qui précèdent ayant été établis pour des polyèdres quelconques, il y a lieu d'examiner les conséquences qui en découlent quand il s'agit d'assemblages réticulaires.

Il est d'abord évident que, dans un assemblage supposé indéfini, *chaque nœud est un centre de symétrie* ; car chaque nœud peut être considéré comme le point de concours d'une infinité de rangées, sur lesquelles les nœuds équidistants se correspondent de part et d'autre.

Maintenant, *toute parallèle à un axe de symétrie, menée par un nœud, est elle-même un axe de symétrie du même ordre.*

Soient N (fig. 19) un nœud et O la trace de l'axe d'ordre n sur un plan normal à cet axe et passant par N. Si nous imprimons à l'assemblage une rotation de $\frac{2\pi}{n}$ autour de O, N viendra en N' et par suite N' doit être la position d'un autre nœud. Donc NN' est une rangée. Si donc nous imprimons à tout le système, suivant cette direction, une translation d'amplitude égale à N'N, il y aura simplement substitution des nœuds et rien ne sera changé. Dailleurs, dans ce mouvement, O viendra en O'. Or on eût obtenu exactement le même résultat par une rotation de $\frac{2\pi}{n}$ autour d'une ligne normale au plan et passant par N. Donc cette ligne est un axe d'ordre n. Il suit de là que si, dans un assemblage, il existe une direction d'axe de symétrie, un axe du même ordre et de même direction passe par chacun des nœuds. On eût pu le déduire, d'ailleurs, du fait que chaque nœud est un centre, puisque nous savons que, dans un polyèdre centré, les axes et les plans passent nécessairement par le centre. Ce fait, en vertu d'un théorème déjà démontré, entraîne une autre conséquence : c'est que, si un assemblage possède un axe binaire, il possède aussi, passant par chaque nœud, un plan de symétrie normal à cet axe et réciproquement.

Fig. 19.

Tout axe de symétrie passant par un nœud est une rangée.

En effet, soit LL' (fig. 20) un axe d'ordre n et soit N un nœud pris sur cet axe. Soit NN_1 une des rangées issues de N. La symétrie propre à l'axe exige l'existence de $n - 1$ autres rangées d'égal paramètre, symétriquement disposées autour de LL'. Or on sait que, dans un assemblage, deux rangées issues d'un même point *se composent*, suivant la règle du parallélogramme des forces, en une rangée résultante. Mais la composition des n rangées égales, symétriquement disposées autour de l'axe LL', ne peut donner lieu qu'à une résultante dirigée suivant l'axe. Donc cet axe est une rangée.

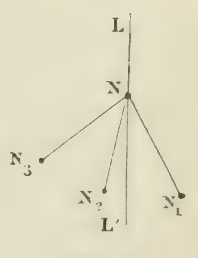


Fig. 20.

Lorsqu'un assemblage possède un axe de symétrie, tout plan mené par un nœud, normalement à cet axe, est un plan réticulaire.

Le théorème est évident quand l'axe est d'ordre supérieur à 2; car alors, en faisant tourner le nœud autour de l'axe, on en obtient au moins deux autres, situés dans le même plan normal et qui suffisent, avec le premier, pour définir un réseau.

Si l'axe est binaire, il suffit d'observer que, par chaque nœud, on peut mener une perpendiculaire à cet axe, laquelle aboutit, de l'autre côté, à un nœud symétrique. D'ailleurs, par un nœud quelconque, on peut mener des parallèles

à toutes ces lignes, avec la certitude que ces parallèles seront des rangées issues du nœud, et toutes ces rangées formeront un plan réticulaire, normal à l'axe en question.

La conséquence de ces théorèmes est que *tout plan de symétrie mené par un nœud est un plan réticulaire*. En effet, par le même nœud, en sa qualité de centre, passe nécessairement un axe binaire perpendiculaire au plan. Ce dernier rentre donc dans les conditions des plans menés par des nœuds normalement à des axes de symétrie.

Nature des axes de symétrie admissibles. — Nous arrivons maintenant à un théorème d'importance capitale. Tandis que, dans un polyèdre quelconque, rien ne limite à l'avance le degré dont la symétrie d'un axe est susceptible, la constitution des assemblages réticulaires est telle qu'elle *ne permet pas l'existence d'axes de symétrie autres que ceux d'ordre* 2, 3, 4 *ou* 6.

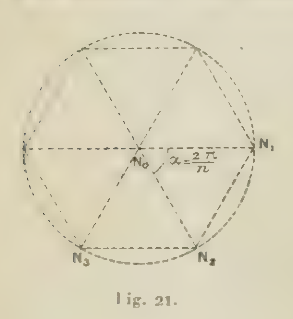


Fig. 21.

Soit N_0 (fig. 21) un nœud pris sur un axe d'ordre n. Dans le plan réticulaire, normal à cet axe, qui passe par N_0, soit N_1 un second nœud, tel qu'aucun autre ne soit plus voisin que lui de N_0. Si l'on fait tourner N_0N_1 autour de l'axe projeté en N_0, de l'angle $\alpha = \frac{2\pi}{n}$ qui convient à la symétrie de cet axe, on devra obtenir en N_2 un nouveau nœud du même plan réticulaire.

Mais N_1N_2 ne peut pas être plus petit que N_0N_1 ; car, en vertu de l'identité des nœuds, une parallèle à N_1N_2, menée par N_0, doit rencontrer un nœud N_3 à la distance $N_0N_3 = N_1N_2$; et, par hypothèse, la distance de N_0 à un nœud quelconque ne peut pas être inférieure N_0N_1. Donc le minimum de N_1N_2 correspond à $N_1N_2 = N_0N_1 = N_0N_3 = N_2N_3$, c'est-à-dire que la plus petite valeur de l'angle α est de 60 degrés. Dans ce cas, n est égal à 6.

Ainsi la plus grande valeur que puisse recevoir le numéro d'ordre d'un axe de symétrie est 6. Tout nombre supérieur serait incompatible avec la constitution réticulaire des assemblages. L'axe étant *sénaire*, le réseau plan normal a pour maille un losange $N_0N_1N_2N_3$, composé par l'accolement de deux triangles équilatéraux.

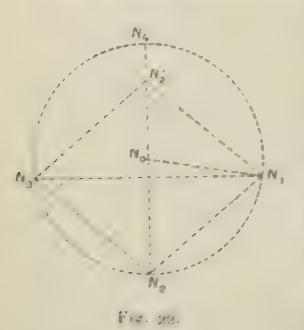


Fig. 22.

Cherchons maintenant la première position que le nœud N_2 puisse occuper pour une valeur de n inférieure à 6.

Pour une position telle que N_2 (fig. 22), il s'en trouvera une autre N_3, à la distance $N_2N_3 = N_1N_2$, et plus grande que N_0N_1. N_2N_0 sera la bissectrice de l'angle $N_1N_2N_3$. Si donc, pour compléter le parallélogramme dont $N_1N_2N_3$ est le

triangle générateur (parallélogramme qui ne peut être qu'un losange, puisque deux côtés adjacents sont égaux), on mène $N_1N'_2$ parallèle à N_2N_3 et $N_3N'_2$ parallèle à N_1N_2, ces deux lignes se rencontreront en un point N'_2, situé sur N_2N_0, entre N_0 et la circonférence de l'autre côté de ce point.

Mais la constitution réticulaire interdit, sur la direction N_0N_2, tout autre paramètre que la distance N_0N_2 elle-même. Il faut donc que le point N'_2, qui dans la solution précédente coïncidait avec N_0, se reporte en N_4, sur la circonférence même. Cela ne peut avoir lieu que si $N_1N_0N_2$ est égal à 90°. On passe donc forcément de $n = 6$ à $n = 4$, c'est-à-dire à l'axe *quaternaire*, ce qui correspond à un réseau à mailles carrées, dont le côté est N_0N_1 (fig. 23).

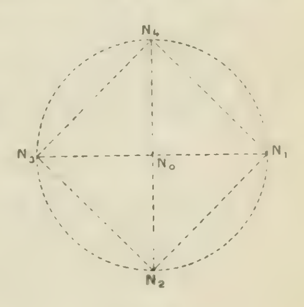


Fig. 23.

Maintenant, soit toujours N_2 (fig. 24) le second nœud cherché. Le nœud N'_2, qui doit lui correspondre sur N_0N_2; ne pouvant plus se trouver en N_4 sur la circonférence, devra venir en N_5, à une distance $N_4N_5 = N_0N_4$. N_2N_5 sera donc une des deux diagonales du losange. L'autre devra être perpendiculaire à la première et passer par le milieu A de N_0N_4. Alors les trois nœuds conjugués seront N_1, N_2, N_3, situés sur la circonférence à des distances angulaires de 120 degrés. Dans ce cas, $n = 3$ et l'axe est *ternaire*.

Le réseau a pour maille le parallélogramme $N_1N_2N_3N_5$; mais comme N_0N_1 exige $N_0N'_1$ et qu'à N_0N_3 correspond $N_0N'_3$, on retombe sur un réseau plan à maille rhombe de 60 degrés.

Enfin, en dehors de ce cas, il n'y a plus qu'une solution admissible : celle qui, reportant le nœud N'_2 à une distance de N_0 égale à trois fois le rayon, place l'intersection des diagonales du losange en N_4, réduisant ce losange à une simple droite : auquel cas on a $n = 2$, c'est-à-dira un axe *binaire*, rien ne fixant la maille du réseau plan normal.

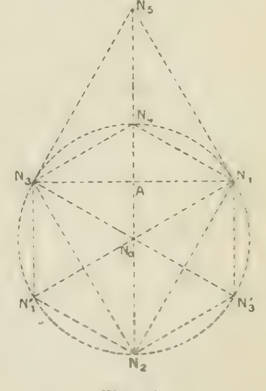


Fig. 24.

En résumé, la symétrie réticulaire n'admet que des axes *binaires*, *ternaires*, *quaternaires* ou *sénaires*, et la symétrie qui correspondrait à $n = 5$ est incompatible avec la constitution des assemblages cristallins.

Relations mutuelles des plans limitrophes dans les assemblages à axes d'ordre pair. — Nous allons démontrer maintenant que, dans un assemblage, tout axe d'ordre n, supérieur à 2, est l'intersection commune de n plans de symétrie. Pour cela, il convient d'établir une proposition préliminaire :

Dans un assemblage pourvu d'un axe d'ordre pair, si l'on considère les plans réticulaires normaux à cet axe, les nœuds de l'un d'eux, projetés orthogonale-

ment sur le plan limitrophe, viennent tomber soit sur les nœuds de ce plan, soit au milieu des distances qui les séparent.

Soit LL' (fig. 25) l'axe d'ordre pair, mené par un nœud N^2 d'un certain plan réticulaire n° 2 et coupé, à des distances égales, par les plans limitrophes 1 et 3. Supposons que ces intersections ne soient pas des nœuds et soit N_1 le nœud de 1 le plus voisin de LL'. Prenons pour plan du tableau le plan passant par l'axe et par N'. Le plan 2, normal à un axe binaire, est un plan de symétrie. Donc N_1 exige son symétrique N'_3. En outre, si l'on mène $N_1N'_2$ parallèle à $N_2N'_3$, N'_2 sera un nœud et l'intervalle paramétrique $N_2N'_2$ sera divisé en deux parties égales par la ligne $N_1N'_3$. Ainsi tout nœud N_1 du plan 1 se projettera sur le milieu de l'intervalle de deux nœuds N_2, N'_2 du plan 2.

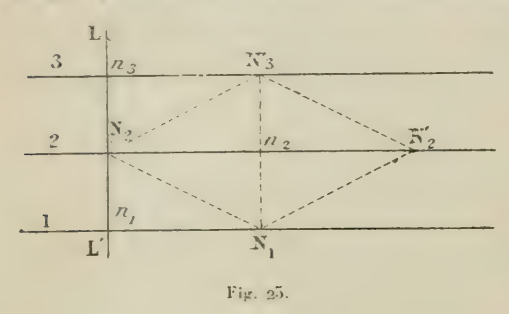


Fig. 25.

S'il y avait un nœud en n_1, il y en aurait un autre en n_3. De plus, N_1 étant supposé le plus voisin de n_1, la rangée $N_1N'_3$ devant être identique avec LL', il faudrait qu'il y eût un nœud en n_2. Dans ce cas les projections des nœuds de 1 et 3 coïncideraient avec les nœuds du plan 2.

Cela posé, étudions le noyau de l'assemblage dans les trois cas qui peuvent se présenter et voyons quelles sont ses conditions de symétrie; car il est évident que les éléments de symétrie du noyau se retrouveront dans l'assemblage, que ce noyau suffit à définir.

Cas de l'axe quaternaire. — Nous savons que, dans le cas d'un axe d'ordre pair supérieur à 2, la maille du plan normal ne peut être qu'un carré ou un losange de 60 degrés. Examinons d'abord le cas du carré, c'est-à-dire de l'axe quaternaire.

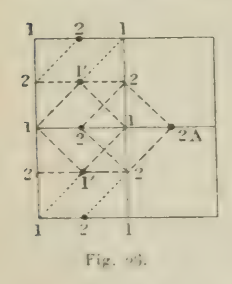


Fig. 26.

Si les nœuds du plan 2 se projettent sur ceux du plan 1, le noyau de l'assemblage est évidemment un prisme droit à base carrée. Ce prisme a quatre plans de symétrie, qui sont les plans parallèles aux faces verticales et les deux plans diagonaux. Donc l'axe quaternaire est l'intersection commune de 4 plans de symétrie. A chacun de ces plans correspond un axe binaire, et ces axes ont pour directions celles des deux côtés et des deux diagonales du carré de base. Ainsi à l'axe quaternaire correspondent quatre axes binaires situés dans le plan normal.

Si les nœuds du second plan se projettent (fig. 26) sur les milieux des côtés du carré 1111, ils doivent venir en 2222. Mais 22 est une rangée parallèle à 11 et qui doit avoir même paramètre. Il faut donc que, dans le réseau 1, il y ait

des nœuds 1′ situés au centre des carrés. La vraie maille devient donc 11′11′ et le noyau est un prisme oblique ayant, pour base inférieure, 11′11′ et, pour base supérieure, 2222A. Ce prisme est évidemment symétrique relativement au plan 1A.

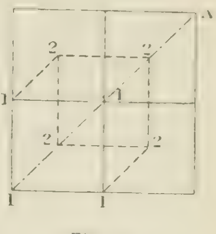


Fig. 27.

Enfin, si les nœuds du second plan coïncident en projection avec les centres des carrés du premier plan, le noyau est un prisme oblique 1111-2222 (fig. 27), évidemment symétrique relativement au plan diagonal 1A. Dans l'un comme dans l'autre cas, puisqu'il y a un plan de symétrie passant par l'axe quaternaire, il y en a quatre en tout et, par conséquent, il y a aussi quatre axes binaires dans le plan perpendiculaire.

Cas de l'axe sénaire. — Passons au cas de l'axe sénaire. Si les nœuds du second plan se projettent sur ceux du premier, le noyau (fig. 28) est un prisme droit, à base rhombe $ON_1N_1'N''_1$, et l'on voit de suite que ce prisme est symétrique relativement à ses deux plans diagonaux ON'_1, $N_1''N_1$. Les projections ne peuvent d'ailleurs occuper d'autres positions. En effet, chacune d'elles est le pied d'un axe sénaire, et il faut qu'en faisant tourner le système de 60 degrés autour de ce point, on procure simplement l'échange des nœuds de l'assemblage. Or cette condition n'est réalisée que si le point en question coïncide avec un nœud, tel que O. En résumé, dans la seule combinaison possible, il passe au moins un plan de symétrie par l'axe sénaire O; donc il en passe en tout six. A ces six plans correspondent d'ailleurs six axes binaires, qui ne sont autres que les rayons et les apothèmes de l'hexagone régulier.

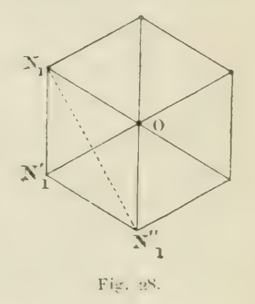


Fig. 28.

Cas de l'axe ternaire. — Il ne nous reste plus à examiner que le cas de l'axe ternaire. La maille, dans le plan normal, étant un rhombe de 60 degrés, les nœuds du plan ne peuvent plus se projeter ni sur ceux du plan 1, ni sur les milieux de leurs intervalles, car le plan normal deviendrait un plan de symétrie, ce qui obligerait l'axe à être d'ordre pair et le transformerait en un axe sénaire. Ces projections ne peuvent tomber qu'à l'intérieur des rhombes. Mais chacune d'elles est le pied d'un axe ternaire, puisqu'il passe un tel axe par chaque nœud, et il faut que les sommets du plan 1 soient distribués, autour du pied de cet axe, conformément à l'ordre de sa

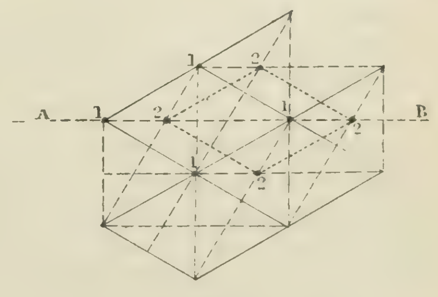


Fig. 29.

symétrie. On en conclut sans peine que les projections doivent coïncider (fig. 29) avec les centres des triangles équilatéraux dont les rhombes sont formés. Mais comme, sur les rangées parallèles, les paramètres doivent demeurer égaux, tous les centres ne sont pas occupés, et au rhombe 1111 du premier plan correspond, dans le second, le rhombe 2222, déplacé, relativement au premier, sur la direction AB, des deux tiers de la hauteur d'un triangle. Il en résulte un noyau ayant la forme d'un prisme oblique à base rhombe, évidemment symétrique relativement au plan AB. Donc il y a au moins un plan de symétrie passant par l'axe ternaire. Donc il y en a trois en tout, et les axes binaires correspondants sont les côtés des triangles équilatéraux.

Résumé. — Ainsi, dans un assemblage, à un axe d'ordre n supérieur à deux correspondent toujours n axes binaires dans le plan normal. La réciprocité est donc absolue entre les axes de divers ordres.

Nous avons vu que, dans tout polyèdre, l'intersection commune de n plans de symétrie était un axe de symétrie d'ordre n. Il résulte de ce qui vient d'être établi que, *dans un assemblage, le nombre des plans de symétrie susceptibles de se couper suivant une même ligne ne peut être que* 2, 3, 4, *ou* 6.

En vertu de la réciprocité qui lie entre eux les axes d'ordre supérieur et les axes binaires, le nombre des axes binaires situés dans un même plan, ou celui des plans de symétrie se coupant suivant une même ligne droite, ne peut être que 2, 3, 4 ou 6, Il suit de là que, *dans un assemblage, deux axes binaires ou deux plans de symétrie ne peuvent faire entre eux que des angles de* 30, 45, 60 *ou* 90 *degrés*. Toute autre valeur est incompatible avec la constitution des systèmes réticulaires.

§ 3

CLASSIFICATION SYSTÉMATIQUE DES ASSEMBLAGES

Assemblages dépourvus d'axes multiples. — Tout nœud d'un assemblage étant un centre de symétrie, un assemblage réticulaire doit toujours être considéré comme un *polyèdre centré*. Dès lors, la présence des axes de symétrie entraîne celle des plans. Par suite, le degré de symétrie le moins élevé dont un assemblage soit susceptible correspond à l'absence simultanée des axes et des plans de symétrie. Si, d'une manière générale, on désigne le centre par C, les axes par L et les plans par P, le symbole d'un tel assemblage pourra s'écrire.

$$0L, \quad C, \quad 0P.$$

Un pareil système est dit *asymétrique*.

Supposons maintenant qu'il existe un seul axe binaire L^2. La présence du

centre entraîne l'existence d'un plan de symétrie P, perpendiculaire à L^2, et le symbole devient.

$$L^2, \quad C, \quad P.$$

C'est le système *binaire*.

S'il existe deux axes binaires, nous savons que ces deux axes doivent se croiser en un même point et faire entre eux des angles droits. Mais l'existence de deux axes binaires dans un plan entraîne celle d'un troisième axe binaire perpendiculaire à tous deux, ce qui donne lieu à un système trirectangulaire. D'autre part, ces trois axes, pris deux à deux, formant trois systèmes rectangulaires, doivent être d'espèces différentes, aucun d'eux ne pouvant être substitué à un autre par une rotation de 180°. Ces trois axes peuvent donc être exprimés par L^2, L'^2, L''^2.

En outre, chaque axe, combiné avec le centre C, nécessite un plan de symétrie qui lui soit normal et qui contienne par conséquent les deux autres axes. Le symbole total de la symétrie sera donc

$$L^2, \quad L'^2, \quad L''^2, \quad C, \quad P, \quad P', \quad P'',$$

les trois plans étant d'espèces différentes comme les axes. C'est le système *terbinaire*.

Assemblages à un seul axe multiple. — Allons plus loin et admettons qu'il existe trois axes binaires dans un même plan. Ces trois axes, qui seront de même espèce (étant en nombre impair), feront entre eux des angles de 120°, en considérant les parties qui se remplacent par rotation, ou de 60° en considérant les prolongements. De plus, il devra exister un axe ternaire qui leur soit perpendiculaire à tous les trois. Enfin sur cet axe ternaire viendront se couper trois plans de symétrie de même espèce, dont chacun, normal à l'un des axes binaires, coupera le plan de ces axes suivant une ligne faisant des angles de 30° avec les axes binaires voisins. C'est tout, et le plan des trois axes ne sera pas un plan de symétrie, car l'axe ternaire, auquel il est normal, n'est pas d'ordre pair. Le symbole de ce système, dit *ternaire*, sera donc

$$\Lambda^3, \quad 3L^2, \quad C, \quad 3P.$$

Après avoir considéré le cas de trois axes binaires situés dans un même plan, nous pouvons supposer qu'il y en ait quatre. Ces quatre axes feront entre eux des angles de 45° et seront de deux espèces distinctes. On pourra les désigner par $2L^2$ et $2L'^2$. Mais ils rendent nécessaire un axe quaternaire Λ^4, perpendiculaire à leur plan et sur lequel viennent se couper quatre plans de symétrie 2P, 2P′, chacun des plans P, perpendiculaire à l'un des axes L, contenant l'autre axe de même espèce, tandis que les plans P′ contiennent les axes L′. D'un autre côté, Λ^4 étant un axe d'ordre pair, son existence, combinée avec celle du centre C, nécessite un plan de symétrie qui lui soit normal. Ce plan

est justement celui qui contient les quatres axes binaires. On le désigne par II, en l'appelant *plan principal* de symétrie, et le symbole total de cet assemblage, dit *quaternaire*, est

$$\Lambda^4, \quad 2L^2, \quad 2L'^2, \quad C, \quad \Pi, \quad 2P, \quad 2P'.$$

Enfin, les axes d'ordre 5 étant inadmissibles, nous n'avons plus qu'une seule combinaison à examiner, celle où six axes binaires sont situés dans un même plan, faisant entre eux des angles de 30°. Ces six axes, étant de deux espèces, répondent au symbole $3L^2$, $3L'^2$. Leur présence entraîne celle d'un axe *sénaire* Λ^6, normal à leur plan et sur lequel se coupent six plans de symétrie, 3P, 3P'. Chacun des plans P, perpendiculaire à un axe L, passe par un axe L' et inversement. En outre, Λ^6 étant d'ordre pair, sa coexistence avec le centre C détermine un *plan principal* de symétrie II, qui est celui des six axes binaires. En résumé, le symbole de ce système, dit *sénaire*, est

$$\Lambda^6, \quad 3L^2, \quad 3L'^2, \quad C, \quad \Pi, \quad 3P, \quad 3P'.$$

Cas de plusieurs axes multiples. — Les considérations qui précèdent nous ont fait connaître successivement six variétés distinctes d'assemblages réticulaires. Mais nous n'avons encore arrêté notre attention que sur les systèmes ne contenant qu'un seul axe d'ordre supérieur à 2 ou, en d'autres termes, sur ceux où il n'y avait qu'un seul plan renfermant à la fois plus de deux axes binaires. Il nous reste donc à voir si la coexistence de plusieurs axes d'ordre supérieur à 2 est possible et dans quelles conditions (1).

Nous allons d'abord démontrer qu'un assemblage pourvu d'un axe sénaire ne peut admettre aucun autre axe de degré supérieur à 2 (2).

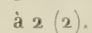


Fig. 30

En effet, s'il y en avait un, distinct de l'axe sénaire et qui fût d'ordre *n* (*n* pouvant être 3, 4 ou 6), l'existence de cet axe entraînerait celle de *n* axes binaires perpendiculaires. Or il est facile de voir que, pour ces nouveaux axes binaires, il n'y a pas de positions admissibles.

Pour le prouver, du centre O de l'assemblage (fig. 30), décrivons une sphère et soit OS l'axe sénaire, tandis que OA, OB, OC, OD, représentent quatre des axes binaires de l'assemblage, faisant entre eux des angles de 30 degrés. Un nouvel axe binaire peut-il venir dans l'intérieur de l'un des

(1) On trouvera, dans le *Traité de Cristallographie* de Mallard, une démonstration générale, qui s'applique à tous les polyèdres indistinctement. Nous nous contenterons ici, pour plus de simplicité, d'examiner le cas des assemblages parallélépipédiques.

(2) Le principe de cette démonstration, comme de celle qui suit, est emprunté à M. F. Sohncke.

triangles SAB, SBC, etc., en P, par exemple? Le plan de symétrie qui passe par SB exigerait un axe symétrique, aboutissant en P'. D'ailleurs P ne peut tomber que sur le plan bissecteur SE du segment SBA ; car il faut qu'une série de rotations de 60 degrés autour de OS puissent substituer, de deux en deux, les points P les uns aux autres, sans en donner plus de six. Même dans ce cas, il est clair que l'angle de deux axes consécutifs, OP et OP', est forcément plus petit que EF, c'est-à-dire que 30 degrés. Or on sait que, dans un assemblage, l'angle de deux axes binaires ne peut tomber au-dessous de cette valeur.

L'intérieur des triangles étant ainsi exclu et aucun axe ne pouvant venir sur le grand cercle AD, en dehors de ceux qui s'y trouvent déjà, il reste à voir s'il peut en exister un dans des plans de symétrie, par exemple en OM, ce qui en exigerait un autre en OM'. Joignons M et M' par un arc de grand cercle. Cet arc, certainement inférieur à CA, c'est-à-dire à 60 degrés, ne peut, pour être admissible, avoir d'autres valeurs que 45 ou 30 degrés. Il en est exactement de même pour SM (car si SM était supérieur à 45°, cela voudrait dire qu'il y a, à 30 degrés de A, un point dont le symétrique doit exister à 30° de S).

Or la réalisation simultanée de ces conditions est impossible. En effet, dans le triangle isocèle SMM', on a

$$\cos MM' = \cos^2 MS + \sin^2 MS. \cos MSM'.$$

MSM' étant égal à 60°, son cosinus a pour valeur $\frac{1}{2}$. Donc

$$\cos MM' = \cos^2 MS + \frac{1}{2}\sin^2 MS = 1 - \sin^2 MS + \frac{1}{2}\sin^2 MS = 1 - \frac{1}{2}\sin^2 MS.$$

Supposons d'abord $MS = 30°$. Alors $\sin MS = \frac{1}{2}$. Donc

[1] $$\cos MM' = 1 - \frac{1}{8} = \frac{7}{8}.$$

Si $MS = 45°$, $\sin MS = \frac{\sqrt{2}}{2}$:

[1] $$\cos MM' = 1 - \frac{1}{4} = \frac{3}{4}.$$

Mais MM' devant être de 30 ou de 40°, son cosinus ne peut être que $\frac{\sqrt{3}}{2}$ ou $\frac{\sqrt{2}}{2}$. Dans les deux cas, il y a incompatibilité avec les valeurs trouvées. Donc aucun axe binaire nouveau ne peut coexister avec les six axes du système sénaire.

Arrivons maintenant au cas de l'axe quaternaire. Soit (fig. 31) OQ cet axe, tandis que OA, OB et OC sont trois des axes binaires perpendiculaires, à 45° les uns des autres.

Nous ne pouvons pas songer à installer un nouvel axe binaire qui aboutisse

dans l'intérieur du triangle ABQ, par exemple en P, sur le plan bissecteur de BQA. En effet, il lui faudrait un symétrique en P′ et l'angle PP′ ne pouvant qu'être inférieur à 45°, la seule valeur admissible serait 30°. Mais s'il en était ainsi, il devrait y avoir six axes binaires dans le plan contenant OP et OP′, ce qui entraînerait l'existence d'un axe sénaire normal à ce plan; chose impossible en vertu de ce qui vient d'être démontré, un axe sénaire ne pouvant coexister avec un autre axe d'ordre supérieur à 2.

Il ne reste donc qu'à placer le nouvel axe dans un des plans de symétrie, par exemple en M, ce qui ne peut se faire que si M est le milieu de l'arc AQ : alors il faut un symétrique sur CQ, en M′.

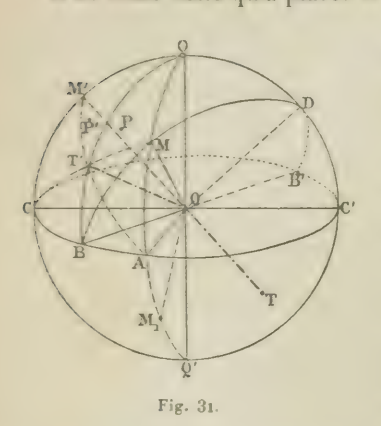


Fig. 31.

En premier lieu, le fait que, dans le plan OAQ, il se trouve trois axes d'ordre pair, OQ, OM, OA, à 45° les uns des autres, entraîne l'existence d'un quatrième axe, en OM, et, par suite, l'axe normal OC′ devient, de ce chef, un axe quaternaire. Mais OQ l'étant aussi, de sorte qu'une rotation de 90° substitue OC′ à OA, OA jouit de la même propriété. Il y a donc *trois axes quaternaires trirectangulaires*, savoir OQ, OA, OC. De plus, si nous joignons MB, le triangle sphérique rectangle MBA nous donnera

$$\cos MB = \cos^2 45^0 = \frac{1}{2}.$$

Donc MB = 60°.

On trouverait la même valeur pour l'arc MD, compris entre le point M et le point D, situé à 45° de Q et de C′, où aboutit OD, symétrique de OM relativement à OQ. Ainsi les trois axes binaires BOB′, OM et OD font entre eux des angles égaux à 60 degrés, ce qui rend leurs positions admissibles et, en même temps, nécessite l'existence d'un axe *ternaire* O T, normal à leur plan. La même chose devant se passer dans les divers octants, nous voyons qu'il y a *quatre axes ternaires*, qui viendront s'ajouter aux axes existants.

La position des points T est d'ailleurs facile à définir. Joignons MC et AM′. Les grands cercles ainsi obtenus seront les traces de deux *plans de symétrie*, puisque chacun d'eux, contenant deux lignes telles que OM et OC, normales à un axe binaire OM′, se trouve perpendiculaire à cet axe. Les deux plans de symétrie se couperont entre eux et couperont le plan de symétrie BQ de l'ancien assemblage quaternaire suivant une ligne OT′, qui sera un axe ternaire, comme étant l'intersection commune de trois plans de symétrie. T′ est donc l'un des huit points cherchés.

Par suite, l'assemblage comporte : 1° *trois axes quaternaires*, OQ, OA, OC, disposés parallèlement aux trois directions d'arêtes d'un cube; 2° *quatre axes*

ternaires, tels que OT et OT′, disposés comme les diagonales du même cube; 3° *six axes binaires*, tels que OM, OB, OM′, dont chacun est bissecteur de l'angle de deux axes quaternaires; 4° *trois plans principaux de symétrie*, QAQ′, CQC′, CAC′, normaux chacun à un axe quaternaire, c'est-à-dire parallèles aux faces du cube; 5° *six plans de symétrie*, dont chacun, normal à un axe binaire, est bissecteur de l'angle dièdre de deux plans principaux (ainsi OT′B est bissecteur du dièdre de QCO et de QAO, tandis que CT′M est bissecteur du dièdre de COA et de COQ). Ces plans représentent les plans diagonaux du cube. Le tout passe par le centre commun de symétrie.

Si, au lieu de partir de l'axe quaternaire, nous nous étions proposé de chercher quels nouveaux axes binaires pourraient venir se joindre à ceux du système ternaire, nous eussions, par des considérations tout à fait semblables, trouvé identiquement la même solution : c'est-à-dire que la seule position admissible eût fait apparaître : 1° des angles de 60 degrés, entraînant l'existence de nouveaux axes ternaires, lesquels ne pouvaient pas être en nombre inférieur à trois; 2° des angles de 45°, faisant naître trois axes quaternaires trirectangulaires.

Il est d'ailleurs tout à fait superflu d'en chercher une démonstration directe. Car, d'une part, nous savons qu'un axe ternaire ne peut coexister avec un axe sénaire. En second lieu, la combinaison de deux axes, l'un ternaire, l'autre quaternaire, est précisément celle qui vient d'être étudiée. Il reste donc à voir si plusieurs axes ternaires peuvent s'associer sans qu'un autre axe principal vienne s'y adjoindre. Or si, à un axe ternaire T_1, on en adjoint un autre T_2, les trois positions que prendra T_2, en tournant autour de T_1, donneront, avec ce dernier, un minimum de quatre axes semblables. Pour que ce minimum ne soit point dépassé, il est clair que ces quatre axes doivent être disposés comme les diagonales d'un cube, c'est-à-dire comme les axes ternaires du système précédemment analysé. Alors chacun d'eux comporte son cortège nécessaire de plans de symétrie et d'axes binaires conjugués, placés comme nous l'avons vu, et ceux-ci, pris deux à deux, faisant des angles de 60 et de 45 degrés, ces derniers entraînent des associations quadruples, qui ressuscitent les axes quaternaires.

En résumé, en dehors de la combinaison dont nous avons reconnu la possibilité, il n'y a rien qui puisse s'accorder avec la constitution particulière des assemblages réticulaires. Le maximum de leur symétrie, correspondant au seul cas où plusieurs axes d'ordre supérieur à 2 puissent coexister, est donc exprimé par le système appelé *terquaternaire*.

Son symbole sera

$$3L^4, \quad 4L^3, \quad 6L^2, \quad C, \quad 3P^4, \quad 6P^2$$

(en désignant par P^4 les plans principaux et par P^2 les plans non principaux).

La règle qui veut que, dans tout assemblage, à un axe quaternaire corres-

pondent, dans un plan normal, quatre axes binaires à 45° d'inclinaison mutuelle, est ici observée. Seulement deux de ces quatre axes ne sont pas uniquement binaires : ils sont en même temps quaternaires. Ainsi s'établit la différence d'espèce que nous savons devoir exister entre les quatre axes du plan et c'est pour cela que les six axes simplement binaires sont tous de même espèce (pouvant être substitués les uns aux autres par rotation autour des axes ternaires), ainsi que les plans non principaux.

§ 4

CHOIX DU MODE DE SYMÉTRIE

Constance du mode de symétrie de chaque corps. — Ayant établi, par l'analyse précédente, le nombre et la nature des combinaisons admissibles pour les assemblages réticulaires, il reste à se demander quelle cause détermine, pour un minéral donné, le choix d'un système de préférence à un autre. La preuve que ce choix n'est pas arbitraire résulte du fait expérimental bien constaté, qu'un même corps, en cristaux homogènes, affecte toujours, non seulement le même genre, mais le même degré de symétrie, impliquant une constance absolue dans la forme et les dimensions du noyau de l'assemblage.

Cette constance serait incompréhensible, si elle n'avait pour cause des particularités inhérentes à la forme des éléments du corps. S'il peut être abusif de chercher ces particularités dans la molécule chimique, qui nous demeure inconnue, il n'en est pas de même en ce qui concerne la *particule complexe*, à l'égard de laquelle l'observation peut nous renseigner suffisamment. Nous sommes ainsi conduits à cette notion, que la particule complexe doit posséder une symétrie propre qui, au moment de la cristallisation, est de nature à déterminer le choix du système cristallin. Alors il est naturel de penser qu'une fois cette particule engendrée, par un groupement convenable de molécules, le système choisi sera celui qui offrira le plus d'éléments communs entre sa symétrie propre et celle de la particule. En dehors de cette considération, la fidélité d'un corps à un système cristallin déterminé demeurerait un véritable mystère.

Influence de la particule complexe. — Nous avons vu que le corps cristallisé devait être considéré comme un assemblage parallélépipédique de particules complexes, toutes identiques et identiquement orientées. Si l'on donne à ce corps, supposé indéfini, une translation telle que le centre de gravité d'une particule vienne en coïncidence avec celui d'une autre, l'ensemble cristallin se retrouvera en pleine coïncidence avec lui-même, puisque la translation n'aura rien changé à l'orientation identique des particules.

Dès lors, un corps cristallisé ne peut posséder et manifester un élément de symétrie que si cet élément est commun à la fois à la particule et au réseau. En

effet, si l'on prend le symétrique du corps relativement à l'élément en question, le cristal doit se retrouver en coïncidence avec lui-même, et, par suite, la même chose a lieu pour le réseau sur lequel s'alignent les centres de gravité.

D'autre part, cette coïncidence d'une particule P avec sa symétrique P′ peut se réaliser par une translation, qui amène le centre de gravité de P sur celui de P′, en donnant à P une nouvelle position P_1; après quoi on prend le symétrique de P_1 relativement à une parallèle à l'élément considéré. Or, après la translation, P_1 coïncidait avec P′, puisque la translation avait respecté l'orientation identique des particules. Si donc cette coïncidence persiste après l'entrée en jeu de l'élément, c'est que ce dernier existe aussi dans la particule (1).

Conditions d'équilibre du corps cristallisé. — Considérons un corps en voie de cristallisation, et sa particule complexe déjà formée. Si cette particule possède un axe, il est aisé de voir que cet axe doit être à la fois une rangée et un axe du réseau choisi (à supposer que le réseau soit susceptible de posséder un tel axe).

En effet, si les particules s'alignent sur l'axe, la résultante des actions exercées par ces particules sur l'une d'entre elles sera dirigée suivant l'axe. Il en sera de même pour la résultante des actions des autres particules, si elles sont alignées sur des rangées symétriquement disposées par rapport à l'axe. Or la particule initiale, possédant un axe d'ordre n, exerce des actions identiques suivant des droites perpendiculaires à cet axe et faisant entre elles des angles égaux à $\frac{2\pi}{n}$. Si donc une particule vient se placer sur une de ces droites, il s'en placera d'autres sur les autres droites et à égales distances de l'axe. Deux particules situées sur deux droites successives, étant soumises à des actions identiques, devront s'orienter symétriquement par rapport à l'axe, c'est-à-dire, en réalité, être orientées de façon identique, puisqu'elles possèdent cet axe.

Ainsi l'axe de la particule initiale devra se retrouver dans l'édifice cristallisé, puisque, grâce à cette symétrie, la résultante des actions des particules sur l'une d'entre elles sera dirigée suivant l'axe; de sorte qu'un écartement convenable des particules alignées sur cet axe, joint à un écartement réciproque convenable des rangées parallèles à ce même axe, suffira pour assurer l'équilibre du système.

On verrait de même que si la particule possède un plan de symétrie, ce dernier devra être à la fois un plan réticulaire et un plan de symétrie de l'assemblage (2).

Observons maintenant que la particule complexe est un polyèdre quelconque, dont la symétrie n'est pas assujettie aux mêmes restrictions que celle des assemblages réticulaires. Cette particule peut posséder des axes d'ordre incom-

(1) Wallerant, *Groupements cristallins*, p. 11. C'est aussi au même auteur que nous empruntons presque textuellement ce qui suit.
(2) Voir Wallerant, *loc. cit.*

patible avec la symétrie des réseaux. Mais si ces axes doivent être des rangées du réseau choisi, ils ne sont pas des éléments de symétrie du réseau et n'interviennent pas dans le choix du système.

§ 5

ASSEMBLAGES A SYMÉTRIE COMPLEXE. ROLE DES PARTICULES CRISTALLINES

Principe d'une nouvelle recherche. — La théorie qui vient d'être exposée semble de tous points irréprochable, et du moment qu'on accepte la notion expérimentale des *particules complexes* identiques, on ne voit pas qu'il puisse y avoir d'autres conséquences géométriques à en tirer.

Cependant, avant de poursuivre le développement de cette théorie, il importe de dire quelques mots d'une conception différente, habituellement présentée par les cristallographes allemands comme beaucoup plus satisfaisante. Introduite dans la science par M. L. Sohncke (1), cette conception a été complétée, depuis lors, par MM. Schoenflies (2) et von Fedorow (3).

Pendant longtemps la théorie des réseaux, telle qu'elle résultait des travaux de Bravais et de ses continuateurs, avait paru réclamer, comme un postulatum nécessaire, l'existence, sur tous les nœuds, de *polyèdres moléculaires* identiques et de même orientation. C'est sous cette forme, en effet, qu'elle était le plus souvent exposée, en particulier dans les premières éditions de ce *Cours*. Or une objection devait se présenter de suite à l'esprit contre une telle manière de voir.

On sait qu'il y a des substances susceptibles de donner, dans certains cas, des cristaux *droits* ou des cristaux *gauches*, c'est-à-dire des polyèdres non superposables. Cela suffit pour mettre en défaut la notion qui précède, en incitant à traiter le problème cristallographique d'une façon différente. La question à résoudre se poserait ainsi : combiner la notion expérimentale de l'*homogénéité cristalline*, c'est-à-dire de l'existence d'une infinité de points homologues, avec l'hypothèse d'une constitution complexe, admettant la coexistence, dans un cristal, d'éléments de deux sortes, les premiers, identiques entre eux et superposables les uns aux autres, mais *différemment orientés* ; les seconds, identiques entre eux, mais *inverses* des premiers, dont ils représenteraient l'image vue dans un miroir. Cette hypothèse semble d'ailleurs tout à fait conforme à l'expérience, puisque cette dernière ne nous montre dans les cristaux, en fait d'organes de symétrie, que des axes, auxquels correspondent

(1) *Die unbegrenzten regelmässigen Punktsysteme als Grundlage einer Theorie der Krystallstructur*, Karlsruhe, 1876. — *Poggendorff's Annalen der Physik*, Ergbd. VII. — *Entwickelung einer Theorie der Krystallstructur*, Leipzig, 1879.

(2) *Krystallosysteme und Krystallstructur*, Leipzig, 1891.

(3) *Soc. minéralogique de Saint-Petersbourg*, 1884, et *Groths Zeitschrift für Krystallographie*, passim.

des éléments superposables, et des plans ou des centres, qui ne peuvent donner que des éléments inverses.

Solution du problème par les assemblages à symétrie complexe. — Ainsi posé, le problème relève de la haute géométrie, et doit trouver sa solution dans l'application, aux corps cristallisés, des règles qui gouvernent les *assemblages indéfinis de points régulièrement distribués dans l'espace*. La question a été traitée par divers savants, notamment par M. Camille Jordan, qui, dans son mémoire sur les *Groupes de mouvements* (1), a établi l'existence de 174 variétés. Plus d'une centaine sont incompatibles avec la structure cristalline ; mais le reste fait connaître les genres de systèmes moléculaires susceptibles d'être ramenés en coïncidence avec eux-mêmes par des mouvements appropriés de l'ensemble.

En s'appuyant sur cette analyse, on trouve que les réseaux de Bravais, ceux que nous avons précédemment étudiés, ne représentent que des cas particuliers, dans un ensemble de combinaisons plus complexes, et capables d'une symétrie plus riche en éléments.

Ce qui caractérise la nouvelle sorte d'assemblages indéfinis, c'est qu'aux plans de symétrie ordinaires, dits *plans de réflexion*, à cause de l'analogie de leur rôle avec celui d'un miroir, viennent s'ajouter des *plans de glissement*, c'est-à-dire tels que la symétrie de réflexion, relativement à ces plans, n'est réalisée que par un glissement du plan sur lui-même, autrement dit une translation d'ensemble de son réseau, suivant une ligne contenue dans le plan. De même, aux axes de symétrie ordinaire ou *axes de rotation* s'aojutent des *axes hélicoïdaux*, pour lesquels la rotation autour de l'axe doit être accompagnée d'une translation suivant ce dernier.

Une série de théorèmes (2) règlent la coexistence de ces diverses sortes d'axes et de plans, permettant d'établir, pour les assemblages complexes, une suite de groupes de symétrie, dont chacun est composé d'éléments tels que, de leur combinaison entre eux et avec les translations du système, il ne puisse résulter aucun élément nouveau. Ainsi se constitue une succession ordonnée de systèmes géométriques, qui répondent et au delà à tous les cas de la cristallisation, et où le degré de symétrie résulte exclusivement de la *structure* de l'assemblage, sans que la considération des polyèdres moléculaires y intervienne.

M. Sohncke distinguait 66 de ces systèmes. M. Schœnflies en a élevé le nombre à 230, répartis, du reste, comme ceux de M. Sohncke, entre 32 groupes de premier ordre, représentant les combinaisons des réseaux de Bravais.

Relation des assemblages complexes avec les réseaux de Bravais. — Mais d'abord il y a lieu de remarquer que les termes de cette série gravitent autour de chacun des systèmes réticulaires de Bravais ; ensuite que chaque

(1) Brioschi e Cremona, *Annali di matematica* (2e sér.), II, 1868.

(2) Voir l'énoncé de ces théorèmes dans F. Wallerant, *Bull. soc. franç. de Minéralogie*, novembre 1898.

groupe de symétrie complexe possède deux sortes d'éléments, les uns, ou *primordiaux*, identiques avec les groupes de Bravais ; les autres, ou *subordonnés*, qui résultent de la combinaison des premiers entre eux et avec les translations du système réticulaire. C'est par le jeu de ces divers organes que, d'un élément initial donné, on arrive à déduire toutes les positions que peuvent occuper, dans un cristal, les symétriques de cet élément.

Cela posé, les éléments primordiaux de symétrie forment autant de faisceaux qu'il y a de points homologues. Autour de l'un de ces points, et dans l'intérieur de la sphère qui limite son domaine relativement aux homologues les plus voisins, représentons-nous, dans l'intérieur du faisceau, une portion de l'espace cristallin, limitée par des éléments de symétrie dont aucun ne la traverse. Ce sera le *domaine fondamental* de M. Schœnflies. Il est clair que, dans l'intérieur de ce domaine, il n'y a pas deux points du cristal qui soient équivalents ; car, s'ils l'étaient, un élément de symétrie les coordonnerait ; or il n'en existe aucun, par hypothèse, dans l'intérieur du domaine.

Dès lors, supposons, avec M. Wallerant, qu'on installe dans ce domaine un groupe de molécules, sur la nature duquel il n'est pas actuellement besoin de faire d'hypothèse, et qui méritera le nom de *particule fondamentale*[1]. Du moment que sa situation dans le domaine est définie, et qu'on connaît les éléments primordiaux, centre, plans de réflexion et axes de rotation du réseau de Bravais auquel appartient le point de départ du faisceau, il suffit de construire, autour de ce point, les symétriques de la particule relativement aux éléments primordiaux. Chacune de ces constructions engendrera un nouveau domaine fondamental, limité relativement à ses voisins par les éléments de symétrie qui en forment le contour ; et toutes ensemble donneront naissance à une *particule complexe*[2], pouvant contenir deux sortes de particules fondamentales : les unes superposables à la particule initiale, si elles en dérivent par une rotation, les autres inverses de celle-ci quand elles en proviennent par une réflexion.

Tous les mouvements devant se répéter identiquement autour des nœuds du réseau primitif, les particules complexes ainsi engendrées seront toutes orientées de la même façon, et chaque point de l'une d'elles, combiné avec le point qui lui correspond dans les autres, donnera évidemment naissance pour son compte à un assemblage réticulaire, identique et congruent avec le réseau initial. C'est dans l'assemblage ainsi enrichi, et formé de l'enchevêtrement d'autant de réseaux identiques qu'il y a de particules, que résidera la symétrie compliquée, exprimée par les plans de glissement et les axes hélicoïdaux. Mais il est clair qu'on peut s'affranchir de cette complication dans l'étude des formes cristallines, à laquelle suffit la considération du *domaine complexe*, aussi nécessaire que l'autre, et qui nous ramène à la notion, déjà établie par l'expérience, des éléments cristallins de même orientation. Ces éléments, sur

(1) C'est le *Stereoedre* de M. von Fedorow. — (2) *Paralleloèdre* de M. von Fedorow.

lesquels l'observation a prise, sont réels, tandis que les particules fondamentales, si vraisemblable qu'en soit l'existence, sont jusqu'à nouvel ordre des conceptions de notre esprit, à peu près au même titre que les polyèdres moléculaires.

L'introduction de la symétrie compliquée ne garde sa raison d'être que quand il s'agit de phénomènes pouvant s'accomplir à l'intérieur de la particule complexe. En ce genre, il n'y a lieu de citer que la polarisation rotatoire. Il sera pleinement temps, lorsque viendra cette question, d'indiquer comment elle peut se rattacher à la notion des axes hélicoïdaux.

Avantages de la considération des particules complexes. — Il y a plus : loin de voir un avantage dans une conception purement géométrique, prétendant tout expliquer par la *structure*, sans établir aucun lien entre celle-ci et la nature des éléments qui s'y conforment, nous estimons qu'il est très préférable de rechercher de suite, comme l'a fait Bravais, la cause de la structure cristalline dans la forme même des éléments constituants. Seulement, pour échapper à des objections légitimes, c'est la considération de la *particule complexe* qu'il faut, avec M. Wallerant, substituer à celle de la *molécule*.

De cette façon, la cristallisation pouvant avoir pour effet, d'abord de constituer la *particule fondamentale* (qui, vu les nombreux stades déjà traversés depuis l'état gazeux, doit être, non la molécule chimique, mais un agrégat de telles molécules et n'est pas nécessairement pourvue de symétrie), le groupement de plusieurs particules fondamentales, superposables ou inverses, engendrerait la particule complexe, édifice dont la symétrie propre déterminerait le choix du système cristallin. Il n'y aurait donc à envisager que cette dernière, seule accessible à l'observation; et comme, en ce qui la concerne, nous avons le droit d'admettre l'identité d'orientation, il serait inutile de faire intervenir, dans l'étude des cristaux, d'autres réseaux que ceux de Bravais (1).

Non seulement ce serait inutile; mais en agissant autrement, d'une part on s'écarterait de la réalité observable, pour tomber plus ou moins dans l'arbitraire; d'autre part on enlèverait toute base solide à l'édifice doctrinal, en se refusant systématiquement à mettre en évidence le rapport qui ne peut manquer d'exister entre la structure d'un cristal et celle de ses éléments constituants.

(1) Pour juger de la simplification didactique qui en peut résulter, il suffira de dire que le seul exposé des propriétés géométriques des assemblages complexes, par M. Schœnflies, forme un volume in-8° de plus de *six cents* pages.

CHAPITRE III

GÉNÉRALITÉS SUR LES FORMES CRISTALLINES

§ I

DÉFINITION DES FORMES CRISTALLINES

Notion de forme cristalline. — Le degré de symétrie d'un système s'accuse au dehors par le nombre et l'espèce des *formes cristallines* dont il est susceptible. Ces formes ne sont pas les figures polyédriques, plus ou moins compliquées, qu'engendrent les faces par lesquelles un cristal naturel doit nécessairement se limiter. De telles figures, en général, ne sont pas simples et résultent, en réalité, de la superposition de plusieurs formes. La notion de forme cristalline a un sens plus étroit, qu'il importe de définir avec précision. On entend par ce mot *l'ensemble de toutes les faces qui, en vertu de la symétrie du système*, doivent se produire *simultanément* dans l'acte de la cristallisation.

Représentons-nous le cristal en voie de formation. Les particules du corps qui va prendre l'état solide se sont déjà disposées comme il convient à la cristallisation ; c'est-à-dire qu'orientées de même façon, elles ont, en outre, leurs centres de gravité placés sur les nœuds d'un assemblage réticulaire. Il faut que la partie solidifiée se limite au dehors, et nous savons déjà que cette limitation ne peut se faire que par des faces planes, puisque c'est suivant des plans qu'il y a identité de constitution des assemblages en réseau. Lorsqu'une de ces faces prend naissance, cela veut dire qu'à ce moment les conditions sont telles que la partie solide tende à se séparer, suivant la direction de cette face, du liquide ambiant. Or la cristallisation est un acte propre, aussi indépendant que possible des influences externes. Les conditions qui déterminent la production d'une face dépendent donc, par-dessus tout, des relations mutuelles des particules ou, pour mieux dire, de l'arrangement des nœuds avec lesquels leurs centres de gravité coïncident. D'autre part nous savons que cet arrangement est identiquement le même pour toutes les directions qui, en vertu de la symétrie particulière au milieu cristallin donné, sont équivalentes à celle que nous considérons. Par suite, les raisons qui déterminent la production d'une face doivent agir, au même moment et au même degré, suivant les directions conjuguées de la première, et ainsi le cristal tend à se limiter simultanément par un ensemble de facettes identiques, toutes dérivées de l'une quelconque d'entre elles, conformément aux exigences de la symétrie du système.

C'est ce qu'avait reconnu Haüy lorsque, partant de la notion des formes prismatiques fondamentales, il énonçait sa *loi de symétrie*, d'après laquelle, dans une

forme primitive, tous les éléments identiques, angles ou arêtes, devaient recevoir simultanément les mêmes modifications.

Génération d'une forme cristalline. — Cela posé, il est facile de se rendre compte du nombre de faces que comporte une forme cristalline simple, dans chaque système. Prenons l'une quelconque des facettes de la forme. Les causes qui en déterminent la production peuvent ne pas nous être connues; toujours est-il que le seul fait de cette production atteste un ensemble de conditions qui agissent identiquement, comme il vient d'être dit, sur d'autres directions et commandent la naissance des facettes conjuguées. Aussi la première peut-elle s'appeler *face déterminante* de la forme, parce que, à elle seule, étant donnée la symétrie du système, elle suffit à engendrer toutes les autres et voici comment : il suffit de la répéter comme il convient autour du centre, des plans et des axes existants. Mais, en vertu de la solidarité absolue qui, dans un assemblage réticulaire, unit les plans de symétrie aux axes, l'existence des premiers étant une conséquence nécessaire de celle du centre et des axes d'ordre pair, si la symétrie est satisfaite relativement aux axes et au centre, elle le sera implicitement par rapport aux plans. Nous n'avons donc pas à nous occuper de ces derniers, et il devra nous suffire, après avoir imprimé à la face déterminante les rotations convenables autour des différents axes, de répéter, relativement au centre, chacune des positions ainsi obtenues.

Détermination du nombre des faces. — Si la face déterminante doit tourner autour d'un axe d'ordre n, cette rotation engendrera $(n - 1)$ positions distinctes de la première. Si donc N_n est le nombre des axes d'ordre n, la face déterminante aura $(n - 1)\,N_n$ homologues. Or nous savons que les seules valeurs admissibles de n sont 2, 3, 4 et 6. Si donc ces divers axes pouvaient exister ensemble, le nombre total des faces engendrées par les rotations, y compris la face déterminante, serait

$$1 + 5N_6 + 3N_4 + 2N_3 + N_2.$$

Mais chaque face obtenue doit se répéter, parallèlement à elle-même, de l'autre côté du centre. Le nombre qui vient d'être indiqué doit donc être doublé, et, par suite, l'ensemble des faces qui composent la forme cristalline simple est donné par la formule

$$2\,(1 + 5N_6 + 3N_4 + 2N_3 + N_2).$$

En substituant à N_6, N_4, N_3 et N_2 les nombres qui conviennent aux divers systèmes, on trouve que, dans le cas le plus général, une forme cristalline comporte 48 faces dans le système terquaternaire, 24 dans le s. sénaire, 16 dans le s. quaternaire, 12 dans le s. ternaire, 8 dans le s. terbinaire, 4 dans le s. binaire et 2 dans le s. asymétrique. On voit donc que, dans les deux derniers systèmes, aucune forme simple ne peut, à elle seule, délimiter entièrement un cristal, puisque le cas le moins compliqué, celui d'un parallélépipède, exigerait encore trois couples de faces parallèles.

Pour que les nombres qui viennent d'être indiqués soient toujours réalisés, il faut que la face déterminante ne soit ni parallèle ni normale à une catégorie d'axes de symétrie; car, dans ce cas, plusieurs des positions obtenues par rotation pourraient se confondre ensemble. C'est ce qu'on exprime en disant que la formule ne s'applique dans toute sa généralité qu'à la *forme oblique* du système, c'est-à-dire à une forme définie par une facette oblique relativement aux axes.

Demi-forme directe. Demi-forme inverse. — Observons maintenant que, si l'on cesse d'envisager les faces comme des plans géométriques, pour y voir des plans régulièrement chargés de particules, il n'y a pas de parité entre les faces dérivées les unes des autres par rotation et celles qui se correspondent relativement au centre. Les premières sont amenées en coïncidence par un mouvement qui les substitue rigoureusement les unes aux autres, de telle sorte que le côté externe, relativement au polyèdre, d'une face, vienne à la place du côté externe de la face homologue. Aussi peut-on dire qu'elles sont *directement semblables*. Au contraire, deux faces symétriques relativement au centre ne peuvent être substituées l'une à l'autre que par une *translation*, qui amène le côté interne ou l'*envers* de la première à la place du côté externe ou *endroit* de la seconde. Aussi dit-on que de telles faces sont *inversement semblables*. Il en serait de même si l'on considérait deux faces symétriques relativement à un plan.

Par suite, toute forme cristalline se décompose en quatre éléments qui sont :

1° La face déterminante;

2° Un nombre de faces directement semblables à celle-ci, qui est de $(5N_6 + 3N_4 + 2N_3 + N_2)$;

3° Une face inversement semblable à la première;

4° $(5N_6 + 3N_4 + 2N_3 + N_2)$ faces directement semblables à la troisième et, par conséquent, inversement semblables à la première.

On peut donc dire que la forme se décompose en deux moitiés, une *demi-forme directe*, composée de 1° et 2°, et une *demi-forme inverse*, composée de 3° et de 4°.

Si (qrs) est le symbole de la face déterminante, la forme totale pourra s'écrire

$$\{ qrs \}$$

et les deux demi-formes pourront être distinguées par

$$\varkappa \{ qrs \} \text{ et } \varkappa \{ \bar{q}\bar{r}\bar{s} \}$$

le signe négatif, placé au-dessus des caractéristiques, indiquant que la face prise pour déterminer la demi-forme est opposée, par l'origine des coordonnées, à (qrs), ce qui évidemment oblige à changer le signe des intersections avec les axes et, par suite, celui des caractéristiques.

Formes restreintes. — On appelle *formes restreintes* celles dont la face déterminante offre, avec les axes de symétrie du système, des relations spéciales, qui font que plusieurs des positions obtenues peuvent n'être pas distinctes, en sorte que le nombre total des faces de la forme se trouve *restreint*.

Les formes de ce genre peuvent être *parallèles* ou *normales*.

Une forme *parallèle* est celle dont la face déterminante est parallèle à l'un des axes de symétrie du système. Si cet axe est d'ordre pair, la face qui lui est parallèle se trouve normale au plan de symétrie qui est perpendiculaire à l'axe. On dit alors que la forme est *orthoparallèle*.

Une forme est *normale* quand la face déterminante est perpendiculaire à l'un des axes de symétrie. Il peut arriver qu'une telle forme soit, en même temps, parallèle à une autre catégorie d'axes.

Si l'axe auquel une forme est parallèle est d'ordre impair (c'est-à-dire ternaire), la forme conserve toutes ses faces; car aucune rotation autour de cet axe ne reproduit de direction identique avec la face déterminante.

Au contraire, si l'axe est d'ordre pair, une rotation de 180° autour de cet axe substitue *directement* $(\bar{q}\,\bar{r}\,\bar{s})$ à (qrs). Il n'y a donc plus lieu de faire intervenir le centre, qui ferait double emploi; la demi-forme directe se confond alors avec la demi-forme inverse et ainsi le nombre des faces de la forme orthoparallèle n'est plus que *la moitié* de celui qu'eût donné la formule générale.

Soit L_n l'axe d'ordre n auquel une forme est normale et soit N le nombre des axes de cet ordre. Au moment où la face (qrs), d'abord inclinée sur L_n, devient normale à cet axe, ses $(n - 1)$ homologues relativement à l'axe arrivent à se confondre. Si donc F était le nombre total des faces de la forme oblique, formant une série de groupes de n faces directement semblables, ce nombre n'est plus que $\frac{F}{n}$. D'ailleurs, s'il n'y a pas de plan de symétrie passant par l'axe L_n, la forme qui lui est normale ne sera pas parallèle à l'axe binaire auquel ce plan est perpendiculaire. Dès lors les demi-formes directe et inverse continueront à être distinctes et chacune d'elles aura un nombre de faces égal à $\frac{F}{2n}$. D'autre part, il est clair qu'à chaque axe L_n correspond une face telle que (qrs) et une autre qui est son inverse $(\bar{q}\,\bar{r}\,\bar{s})$. Donc le nombre total des faces de la forme est de 2N et l'on a

$$2N = \frac{F}{n} \text{ ou } Nn = \frac{F}{2}.$$

Mais s'il existe un plan de symétrie passant par L_n, la normale à ce plan est un axe binaire, auquel L_n est perpendiculaire. Dès lors (qrs) est parallèle à cet axe. La forme est donc orthoparallèle; les deux demi-formes directe et inverse se confondent et l'on a

$$2N = \frac{F}{2n} \text{ ou } Nn = \frac{F}{4}.$$

Les seuls axes par lesquels ne passe aucun plan de symétrie sont : 1° l'axe unique du système binaire ; 2° les trois axes binaires du système ternaire. Dans tous les autres cas, le nombre des faces de la forme normale est $\frac{F}{2n}$.

§ 2

NOTION DES FORMES MÉRIÉDRIQUES

Développement incomplet de certaines formes cristallines. — Une forme cristalline étant un ensemble de faces, pour lesquelles la disposition du plan réticulaire est la même, *si les particules disposées sur les nœuds de ces plans étaient de simples points matériels ou agissaient comme de tels points*, tout serait semblable de part et d'autre de deux faces de même espèce, en voie de formation dans un milieu cristallin. Par suite, ces faces devraient toujours se produire ensemble et ainsi toute forme cristalline semblerait devoir se montrer, sauf les cas d'avortement purement accidentel, avec le nombre complet de faces qui la caractérise (1).

Cependant les choses ne se passent pas toujours de cette manière, et il est des cas nombreux où une partie des faces fait défaut, sans qu'on en puisse attribuer l'absence à une action extérieure, telle que l'influence du milieu ambiant. Cette disparition n'est d'ailleurs pas capricieuse, et, pour une même forme, elle ne porte que sur certaines faces, placées d'une façon déterminée. Le cas le plus habituel est celui qu'offrent les cristaux de quartz, de pyrite, de tourmaline, etc., où l'on n'observe souvent que *la moitié* des éléments dont la symétrie du système exigerait la coexistence.

Cette dérogation à la loi de symétrie n'avait pas échappé au fondateur de la cirstallographie. Mais Haüy n'en connaissait qu'un très petit nombre d'exemples, et il avait cru pouvoir considérer comme une anomalie sans importance une disposition aussi rarement réalisée. En 1819, Weiss reconnut la généralité de ce phénomène, souvent masqué, au premier coup d'œil, par certaines apparences extérieures, qui empêchent d'apercevoir la dyssymétrie. Il lui donna le nom d'*Hémiédrie* et en fit connaître les lois expérimentales, sans se préoccuper d'ailleurs d'en découvrir la cause. Plus tard, Delafosse montra qu'il existait un second ordre d'hémiédrie, nommé par lui *Tétartoédrie*, en vertu duquel une forme cristalline pouvait être réduite au quart du nombre normal de ses faces. Continuant à enregistrer ce résultat comme un fait d'expérience, les cristallographes allemands admirent que la nature avait la faculté de produire, tantôt des cristaux complets ou *holoédriques*, tantôt des formes réduites, simples *variétés par défaut* des premières, et, attribuant la production de ces

(1) Bravais, *Études cristallographiques*, p. 196.

variétés incomplètes à l'action des milieux ambiants, ils se bornèrent à préciser, par l'observation, les lois géométriques du phénomène. C'est ainsi qu'ils furent conduits à énoncer les règles suivantes (1) :

Lois expérimentales de l'hémiédrie. — De même que les diverses formes cristallines, qu'une substance donnée peut offrir, sont indépendantes les unes des autres, de même, dans certains cas, une indépendance analogue semble exister entre les deux moitiés d'une forme déterminée. Quand cela arrive, le choix des faces de la forme qui doivent disparaître est réglé par une loi constante, dont voici la formule :

Si l'on suppose que toutes les faces de la forme complète aient été transportées à la même distance d'un point central, par lequel passent tous les axes de symétrie, les faces supprimées sont choisies de telle façon que, *aux deux extrémités d'un même axe de symétrie, c'est-à-dire de part et d'autre du centre, il y ait le même nombre de faces conservées, se coupant entre elles et coupant l'axe suivant les mêmes angles*. De plus, *à tous les axes de même espèce correspondent les mêmes valeurs pour le nombre et les angles mutuels des faces qui viennent s'y couper.*

Les formes réduites à la moitié de leurs faces étant appelées *hémiédriques*, l'observation montre qu'il peut y avoir trois modes particuliers d'hémiédrie, obéissant d'ailleurs, les uns et les autres, à la loi qui vient d'être énoncée.

Dans le premier mode, dit *hémiédrie plagièdre*, la suppression des faces a lieu de telle sorte que les deux polyèdres formés, l'un par les faces conservées, l'autre par les faces supprimées, ne soient pas superposables. On les dit alors *énantiomorphes*. Chaque face du premier est symétrique de l'une des faces du second relativement à un plan de symétrie. Les deux polyèdres sont donc l'un à l'autre ce qu'un objet est à son image réfléchie par un miroir.

Dans le second mode, dit *hémiédrie à faces parallèles* ou *parahémiédrie*, la suppression des faces donne lieu à deux solides conjugués superposables, ne différant l'un de l'autre que par leur orientation et, de plus, tellement constitués que, dans chacun d'eux, les faces soient deux à deux parallèles et opposées par le centre.

Enfin le troisième mode, dit *hémiédrie à faces inclinées* ou *antihémiédrie*, est caractérisé par ce fait que les solides conjugués, toujours superposables, n'offrent pas de couples de faces parallèles.

Tels seraient donc, en vertu de l'observation, les caractères fondamentaux de l'hémiédrie, caractères également applicables au cas où la réduction porterait sur les trois quarts des faces, faisant naître une *tétartoédrie*. De plus, il y aurait incompatibilité absolue entre les divers genres d'hémiédrie et on ne devrait jamais rencontrer, associées sur le même cristal en combinaison multiple, à la fois des formes parahémiédriques et des formes antihémiédriques.

On remarquera que cette définition ne laisse absolument rien soupçonner

(1) Voir Groth, *Physikalische Krystallographie*, p. 186.

relativement à la cause de l'hémiédrie. D'ailleurs elle est insuffisante; car il y a des cristaux, tels que ceux de tourmaline et de calamine, où certaines combinaisons de formes, bien développées à l'une des extrémités d'un axe de symétrie, font totalement défaut à l'autre extrémité. Aussi, pour justifier cette particularité, a-t-il fallu ajouter à la notion de l'hémiédrie celle de l'*hémimorphisme*, propriété tout aussi mystérieuse que la précédente, permettant à la nature de ne réaliser que la moitié des combinaisons de l'hémiédrie.

Connexion entre l'hémiédrie et certaines propriétés physiques. — Il y a bien des années que Delafosse s'est élevé contre cette interprétation purement géométrique des phénomènes. Avant lui, Haüy s'était aperçu que, lorsqu'on chauffe un cristal dont les deux extrémités ne sont pas exactement semblables, ces extrémités prennent des électricités de signes contraires. Généralisant cette observation, Delafosse a montré que l'hémiédrie est toujours accompagnée de certains phénomènes physiques, accusant une inégalité dans des éléments d'apparence identique. Il a de plus indiqué la cause probable du phénomène dans la forme même des particules constituantes. A cette époque, conformément aux idées d'Haüy, on regardait les cristaux comme formés par la juxtaposition de *particules intégrantes* identiques, dont chacune était elle-même un petit cristal, susceptible d'être isolé par le clivage. Or, au lieu de composer un cube avec des particules cubiques, on peut, à condition de négliger l'influence des intervalles vides, composer ce cube avec des *tétraèdres*. Il suffit que, dans chaque strate, les bases contiguës des tétraèdres, tous orientés de la même façon, soient situées dans un même plan, tangent aux sommets des tétraèdres de la strate sous-jacente. En pareil cas, la face inférieure du cube étant formée par la juxtaposition de triangles plans équilatéraux, la face supérieure est constituée par l'affleurement d'une infinité de sommets aigus. Dès lors, ces deux faces ne sont pas *physiquement* identiques. On verrait de même que certaines arêtes du cube deviennent ainsi les lieux des côtés homologues des triangles servant de bases aux tétraèdres, tandis que les arêtes opposées sont les lieux des sommets de ces triangles.

Partant de cette conception, Delafosse a pu restituer à la loi de symétrie d'Haüy toute la généralité désirable. Il suffisait de poser en principe que, pour être affectés par les mêmes modifications, les éléments d'une forme primitive doivent être identiques, non seulement au point de vue *géométrique*, mais encore au point de vue *physique*. De cette manière, l'hémiédrie n'apparaît plus comme une anomalie, une dérogation à la règle. Elle trouve sa raison d'être dans la constitution intime des milieux cristallisés, et ne fait que mettre en évidence la forme particulière des particules intégrantes, que l'observation directe serait impuissante à dévoiler.

Étude rationnelle de l'hémiédrie. Considération de la particule complexe. — Mais la considération des assemblages réticulaires va nous conduire, avec Bravais, à des notions beaucoup plus précises.

Nous avons déjà montré comment la symétrie propre d'une particule complexe devait influer sur le choix du système réticulaire. Cela posé, on remarquera qu'il existe seulement sept espèces de réseaux géométriques, dans la symétrie desquels chaque particule complexe devra trouver sa satisfaction.

Mais cette particule est un polyèdre ordinaire, qui n'est pas assujetti aux mêmes lois que l'assemblage parallélépipédique. D'une part, elle peut posséder des axes de symétrie d'un ordre quelconque, différent de 2, 3, 4 ou 6. D'autre part, ceux de ses éléments de symétrie qui sont de même nature que les éléments de l'assemblage choisi peuvent ne pas offrir les mêmes combinaisons; car l'assemblage est toujours centré, tandis que la particule complexe ne l'est pas nécessairement. Celle-ci devra faire choix d'un assemblage qui lui convienne. Mais les résultats de ce choix seront très différents, suivant que la particule possédera la totalité ou seulement une partie des éléments de symétrie de l'assemblage choisi.

Influence de la symétrie de la particule. — En effet, les faces des cristaux ne sont pas de simples plans géométriques : ce sont des surfaces chargées de particules complexes dont les centres de gravité sont disposés en réseau. Admettons que, par suite de l'existence d'un axe d'ordre n dans le réseau, la production d'une face paraisse devoir entraîner celle de $(n-1)$ autres faces, géométriquement symétriques de la première. Soit F celle-ci, et F′ l'une de ses symétriques (fig. 32).

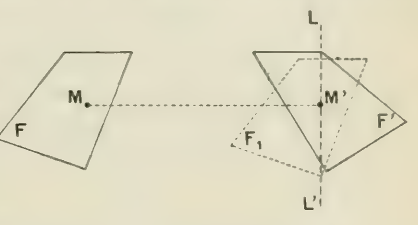


Fig. 32.

Les axes de symétrie n'ayant pas de position fixe dans un milieu cristallisé, et n'étant définis que par leur direction, la substitution de F à F′ peut s'opérer de la manière suivante. Choisissant sur F un centre particulaire M et sur F′ un centre homologue M′, on peut opérer la translation de la face F, demeurant parallèle à elle-même, suivant MM′, et, quand M′ coïncide avec M, faire tourner F, ainsi parvenue dans sa seconde position F_1, de $\frac{2\pi}{n}$ autour d'une ligne LL′ menée par M′ parallèlement à l'axe existant.

Puisque cet axe est un axe de l'assemblage géométrique, il est évident qu'après ce double mouvement, de translation et de rotation, les nœuds de F coïncideront rigoureusement avec ceux de F′. Mais il faut maintenant considérer les *particules complexes*, dont les centres de gravité occupent les points M et M′. Identiques entre elles, elles étaient en outre, au début, orientées *parallèlement*, ce qui est, nous l'avons dit, une condition essentielle de la cristallisation. La translation de M en M′ a respecté cette identité d'orientation et a ainsi amené les deux particules en coïncidence absolue. Mais quand la face F, devenue F_1, tourne, entraînant avec elle la particule M, autour de l'axe

d'ordre n, *si cet axe fait défaut à la symétrie propre de la particule*, celle-ci ne sera plus, après le mouvement, en coïncidence avec sa première position. *Toutes les particules de F' seront ainsi orientées autrement que les particules de* F', ce qui est en contradiction avec les exigences de la cristallisation. Leurs rapports de position, vis-à-vis du milieu intérieur ou du milieu ambiant, ne seront plus les mêmes que pour F. Par conséquent, les raisons physiques qui ont déterminé la formation de la face F ne se feront pas sentir pour F', et cette face F' *ne se produira pas*; ou tout au moins sa production ne sera pas une conséquence forcée de la formation de F, comme cela fût arrivé si on avait pu traiter F et F' comme de simples plans géométriques.

On verrait de même que, quand une particule complexe est dépourvue de centre, cela met en défaut la loi qui veut que, dans tout polyèdre centré, à une face corresponde sa parallèle de l'autre côté du centre; de même pour les plans de symétrie. En vue de rendre la chose bien sensible, considérons deux faces F et F' (fig. 33) symétriques l'une de l'autre relativement à un centre C. Si les particules sont elles-mêmes centrées et agissent comme des sphères (1), il est évident que les deux faces F et F' seront, *relativement au dehors, dans des conditions identiques*. Par suite l'action qui engendre l'une d'elles devra aussi engendrer l'autre. Mais si (fig. 34) les particules, sphériques d'un côté, se terminaient de l'autre en pointe, il est clair que celles de la face F, qui présentent au dehors leur côté arrondi, agiraient autrement, sur le milieu ambiant, que celles de F', lesquelles, devant être orientées comme les premières, tourneraient leurs pointes vers l'extérieur. Chaque face aurait ainsi ce qu'on peut appeler un *endroit*, et un *envers*. Tandis que l'une se présenterait au dehors par son endroit, l'autre s'offrirait aux mêmes actions extérieures par l'envers. Les conditions seraient donc différentes et il n'y aurait pas de raison nécessaire pour la production simultanée des deux faces.

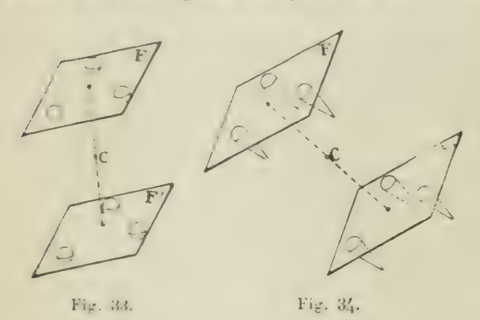


Fig. 33. Fig. 34.

En résumé, un corps cristallisé ne peut posséder, comme éléments de symétrie, que ceux qui sont communs au réseau géométrique et à la particule complexe. Tout désaccord entre la symétrie de la particule et celle de l'assemblage est susceptible de se traduire, sur les cristaux, par l'absence de certaines faces, dont la constitution du réseau semblait devoir entraîner l'existence. Tandis donc que, pour les particules pourvues de tous les éléments de l'assem-

(1) Pour plus de simplicité dans la figure, nous donnons à la particule une forme sphérique: mais le résultat serait le même et on se rapprocherait beaucoup plus de la réalité, si l'on faisait de chaque particule un polyèdre à faces planes, tel qu'une pyramide centrée.

blage, les formes cristallines sont complètes ou *holoédriques*, pour les autres on doit s'attendre à les voir incomplètes ou *mériédriques* (1). Laissant ici de côté le cas où la particule complexe posséderait des éléments de symétrie incompatibles avec la nature des assemblages réticulaires, occupons-nous seulement du cas où il y a concordance.

Cas de symétrie réticulaire. Examen du principe de la moindre symétrie. — Pendant longtemps, on a admis, au moins implicitement, avec Bravais, qu'un corps en voie de cristallisation choisissait *nécessairement* celui des assemblages dont la symétrie concordait le plus exactement avec celle de sa particule. De la sorte, parmi tous les réseaux offrant les éléments de symétrie de celle-ci, c'était toujours le réseau de *moindre symétrie* qui était choisi. Ainsi une particule ne possédant qu'un axe binaire eût adopté forcément le réseau binaire. De même, la possession d'un axe ternaire et de trois axes binaires normaux eût entraîné pour une particule l'adoption obligatoire du réseau ternaire, tandis que le réseau terquaternaire n'aurait été choisi que par une particule possédant au moins $3L^2 4L^3$.

Mais M. Wallerant a fait remarquer que, si cette restriction se produisait le plus souvent, parce qu'un tel choix n'impliquait, chez la particule, aucune condition spéciale, du moins elle ne s'imposait pas d'une façon absolue. *A priori* rien n'empêche une particule ternaire de choisir un réseau cubique, à la condition d'orienter son axe ternaire suivant un axe ternaire du dit réseau, et ses trois axes binaires suivant ceux des trois axes binaires du réseau terquaternaire qui sont normaux à l'axe ternaire choisi.

Il est bien vrai que, pour justifier l'adoption d'un réseau déterminé, il ne suffit pas que la particule complexe possède certains éléments de symétrie de ce réseau; il faut encore que les actions mutuelles des particules satisfassent à des conditions déterminées. Par exemple, pour qu'un corps ait un motif d'adopter le réseau cubique, il faut que les actions exercées suivant les trois axes terquaternaires soient égales entre elles. Or si cette condition est pleinement réalisée quand la particule complexe, sans avoir trois axes quaternaires, a du moins trois axes binaires de même espèce rectangulaires entre eux (on démontre en géométrie que cela entraîne l'existence de quatre axes ternaires de même paramètre), il n'en est plus ainsi pour une particule pourvue d'un seul axe ternaire, et encore moins pour celle qui n'aurait qu'un axe binaire.

La symétrie de l'édifice cristallin est déterminée par ceux des éléments qui sont communs à la particule et au réseau sur lequel elle s'oriente. Tant que la formule de cette symétrie reste supérieure à celle de l'assemblage réticulaire venant immédiatement après celui que la particule a choisi, les conditions qu'implique ce choix se trouvent satisfaites par simple raison de symétrie, quelle que soit la particule. Dans le cas contraire, le choix d'un réseau de

(1) Le mot de *méroédriques*, employé dans quelques ouvrages, paraît plus conforme à l'étymologie.

degré trop élevé demande à être justifié par des raisons propres à la particule.

Notion de la symétrie limite. — C'est ici qu'intervient la considération extrêmement importante des *éléments-limites* de symétrie. A côté des éléments réels, pleinement conformes aux exigences rigoureuses de la géométrie, une particule peut avoir d'autres éléments, très rapprochés de ce qui serait nécessaire pour la faire passer dans un groupe plus élevé. Si ces éléments sont tels qu'en les traitant comme éléments réels la particule prenne une position qui différera de la position initiale, moins que toute autre, résultant d'un mouvement de la particule par rapport à un élément voisin, on pourra leur donner le nom d'*éléments-limites*. Ainsi une droite sera dite *axe-limite d'ordre n*, lorsque, après une rotation de $\frac{2\pi}{n}$ autour de cette droite, la particule se retrouvera moins éloignée de sa position initiale que pour toute autre rotation. De la sorte, en se plaçant symétriquement par rapport à un tel élément, la particule possédera, avec sa première position, un volume commun qui sera plus grand que pour tout autre élément voisin (1).

Pour préciser la notion d'un *plan-limite*, considérons une particule complexe pourvue d'un plan réel de symétrie. Les éléments sont orientés deux à deux et symétriquement par rapport au plan, leurs centres de gravité se faisant face deux à deux sur des diamètres normaux au plan. Or si tous les diamètres s'inclinent légèrement sur le plan et si les éléments matériels tournent légèrement autour de leurs centres de gravité, le plan se transforme en plan-limite. Bien entendu, des deux conditions énoncées, une seule suffit. Les diamètres peuvent rester normaux au plan, la déformation consistant dans un faible mouvement autour du centre de gravité; ou inversement les diamètres peuvent s'incliner, les éléments conservant leurs orientations.

De même, si un axe de symétrie s'incline légèrement par rapport au plan normal du polygone régulier sur lequel les centres de gravité des éléments matériels symétriques sont distribués, ou si, l'axe restant fixe, les éléments tournent un peu autour de leurs centres de gravité, l'axe devient un axe-limite.

En définitive, tantôt les organes de la symétrie-limite auront, les uns par rapport aux autres, la position qui convient aux organes réels, la différence ne portant que sur l'orientation des éléments matériels de la particule. Tantôt la position relative des organes-limites ne sera qu'approximativement celle qui conviendrait à la symétrie réelle. En outre, tous les organes-limites d'une particule complexe pourront ne pas présenter le même degré d'approximation. Par exemple, une particule pourvue d'un axe quaternaire réel et d'un axe binaire-limite, normal au premier, aura nécessairement trois autres axes binaires-limites de même approximation. Mais si, en outre, elle possède un

(1) Wallerant, *Groupements cristallins*, p. 15.

plan-limite de symétrie passant par l'axe quaternaire, ce qui en fait naître trois autres de même approximation, celle-ci pourra être ou supérieure, ou inférieure, à celle des axes binaires. De la sorte, l'influence des divers éléments-limites pourra se faire sentir d'une façon plus ou moins énergique dans les phénomènes qui dépendent de leur existence (1).

Influence des éléments-limites. — Occupons-nous maintenant, avec M. Wallerant, de rechercher l'influence des organes-limites d'une particule complexe sur les propriétés de l'édifice cristallin. Il va de soi que les axes-limites seront des rangées du réseau, et que les plans-limites en seront des plans réticulaires, puisque, parmi toutes les droites ou tous les plans passant par le centre de gravité de la particule, ce sont ces éléments-limites qui satisfont avec le plus d'approximation aux éléments de symétrie réels. Par suite, ils deviendront aussi des éléments-limites du *corps cristallisé*.

Mais seront-ils aussi des éléments de symétrie du *réseau géométrique* de ce corps? Deux cas sont à distinguer : ou bien les organes limites font entre eux des angles légèrement différents de ceux des organes réels; alors le réseau ne peut lui-même les posséder qu'à titre d'éléments-limites. Ou bien, quoiqu'ils ne correspondent qu'à une symétrie approchée, leur position respective est bien celle qui conviendrait à des organes réels. Alors ils appartiennent bien au réseau comme éléments réels. Ce dernier possède en fait une symétrie qui peut être très supérieure à celle du corps cristallisé, et ainsi naîtra une structure mériédrique spéciale.

Par exemple, imaginons une particule qui possède, à titre d'éléments réels, un axe ternaire et trois axes binaires normaux. En outre, elle est construite de telle façon qu'après rotation de 90° autour d'une ligne, faisant avec l'axe ternaire un angle égal à 54°44′15″ (angle d'un axe A^4 avec un axe L^3 dans le réseau terquaternaire), les particules fondamentales retrouvent une orientation à peu près identique avec celle qu'elles avaient auparavant. L'axe est donc, pour la particule complexe, un *axe quaternaire-limite*. Il est alors tout naturel que, dans la cristallisation, cette particule soit amenée à choisir un réseau terquaternaire, en orientant exactement son axe-limite suivant un des axes quaternaires du réseau. Ce réseau, concordant en direction avec les éléments de symétrie, réels et limites, de la particule, aura donc la symétrie terquaternaire, quand la particule ne possédera que la symétrie ternaire.

Or les cas-limites sont extrêmement fréquents dans la nature. De même que les ellipsoïdes qui expriment les propriétés physiques des corps, comme aussi ceux qui représentent la figure des planètes, diffèrent très peu de sphères parfaites, ainsi le nombre est considérable des substances qui, sans atteindre pleinement une symétrie élevée, s'en rapprochent du moins beaucoup par leur constitution intime. On conçoit donc qu'elles puissent profiter de cette simili-

(1) Wallerant, *Les groupements cristallins*, p. 16.

tude pour réaliser, par l'adoption d'un réseau plus parfait, une symétrie supérieure qui leur assurera une plus grande stabilité mécanique.

Groupes mériédriques de symétrie. — Cependant si, en raison de cet intérêt d'équilibre, le choix du réseau peut se trouver déterminé, non plus seulement par les éléments réels, mais aussi par les éléments-limites de la particule, un tel arrangement ne va pas nécessairement jusqu'à supprimer les différences de position des polyèdres complexes, relativement à ce qu'exigerait une symétrie totale parfaite comme celle du réseau. Aussi le cristal ne met-il en évidence, par ses facettes, que la symétrie réelle, de telle sorte qu'il se manifeste un désaccord entre les formes visibles et ce que laisserait prévoir la forme du réseau.

En résumé, les cristaux homogènes peuvent se répartir en trois grands groupes :

1° Ceux auxquels rien ne manque, parce que les éléments du réseau existent en totalité et en réalité dans la particule. Ce sont les cristaux *holoédriques*;

2° Ceux chez lesquels la particule, moins riche que le réseau choisi, l'est cependant encore plus que le réseau immédiatement inférieur : c'est ce que M. Wallerant nomme les cristaux *mériédriques à symétrie élevée*;

3° Les cristaux chez lesquels l'existence d'éléments-limites a permis à la particule d'adopter un réseau d'ordre notablement supérieur à sa symétrie propre. Ce sont les cristaux *mériédriques à symétrie restreinte* de M. Wallerant. Et, parmi ceux-ci, on en peut encore distinguer de deux espèces, suivant que, par suite de leur disposition, les organes-limites de la particule seront des éléments réels ou des éléments-limites de l'assemblage choisi.

§ 3

ÉTUDE DES GROUPES MÉRIÉDRIQUES

Groupes à symétrie élevée. Principe de la recherche. — Il va maintenant nous être facile de déterminer les différents groupes de symétrie qui peuvent être réalisés par les cristaux mériédriques. Occupons-nous des formes à symétrie élevée et recherchons, pour ce cas, avec Bravais, dans quelles limites doit se tenir l'écart entre la symétrie du réseau et celle de la particule complexe.

Supposons d'abord que la particule soit dépourvue de centre; dans ce cas, des deux faces parallèles exigées par la symétrie de l'assemblage relativement au centre, une seule se produira. Le nombre des faces d'une forme oblique quelconque sera donc diminué de moitié.

Si la particule complexe ne possède pas tous les axes de symétrie de l'assemblage, il est aisé de voir que, parmi les axes qui feront défaut, il devra toujours

se trouver des axes binaires. En effet, dans les systèmes de symétrie que nous avons définis, les axes binaires sont tellement combinés que leur coexistence, dans un polyèdre quelconque, entraîne forcément la présence des axes d'ordre supérieur. Par exemple, si un polyèdre possède les six axes binaires de l'assemblage sénaire, il possède aussi l'axe sénaire, puisque à 6 axes binaires dans un plan correspond un axe d'ordre 6, normal à ce plan. Il y a donc, de part et d'autre, identité dans le nombre des axes.

De plus, si un axe binaire d'une certaine espèce fait défaut, les autres axes de même espèce doivent également manquer; car les axes d'une espèce donnée forment entre eux des angles qu'on ne peut modifier. Ainsi deux axes binaires faisant un angle de 60° ne peuvent exister sans un troisième, etc.

S'il existe dans un assemblage deux espèces d'axes binaires, on ne peut, dans la particule complexe, admettre l'une de ces espèces sans l'autre que si, dans cette même particule, on abaisse de moitié le numéro d'ordre de l'axe principal.

En effet, nous avons démontré que si, perpendiculairement à un axe d'ordre n, il y a un axe binaire, il doit y en avoir n en tout. La conservation du numéro d'ordre de l'axe multiple nécessite donc, ou le maintien de tous les axes binaires, ou la suppression de tous à la fois.

Combinaisons admissibles pour le degré des axes. — D'après ce qui vient d'être établi, les particules complexes, en ce qui concerne les axes, ne peuvent offrir que trois combinaisons :

1° Tous les axes de l'assemblage, sans exception, se retrouvent dans le polyèdre qui est dit *holoaxe*;

2° Le polyèdre est privé de tous les axes binaires; mais il possède un axe principal du même ordre que celui de l'assemblage. Dans ce cas, comme une face déterminante exécute, autour des axes binaires, juste autant de rotations qu'autour de l'axe principal, la moitié des rotations se trouve supprimée. Le polyèdre est dit *hémiaxe*. Mais cette suppression peut aussi être obtenue si, conservant la moitié des axes binaires, on divise par deux le numéro d'ordre de l'axe principal. Il y a donc deux manières de rendre un polyèdre hémiaxe;

3° Le polyèdre n'a pas d'axes binaires et le numéro d'ordre de son axe principal n'est que la moitié de celui de l'assemblage. Alors les trois quarts des rotations possibles sont supprimées ; le polyèdre est dit *tétartoaxe*.

Comme, d'ailleurs, il n'est pas possible de faire subir de nouvelles réductions aux axes d'ordre 4 et 6, seuls admissibles en cristallographie, il en résulte qu'il n'y a pas d'autres combinaisons que celles qui viennent d'être énumérées.

Polyèdres holoaxes. — Il nous reste à examiner comment la suppression du centre se concilie avec la réduction des axes. D'abord, si un polyèdre holoaxe est en même temps centré, la combinaison du centre avec les divers axes d'ordre pair fait naître nécessairement tous les plans de symétrie. Le

olyèdre possède donc tous les éléments de l'assemblage et les formes sont *oloédriques*.

Si le polyèdre holoaxe est dépourvu de centre, il est, par cela même, dépourvu de plans (car la combinaison des plans avec les axes pairs reconstituerait le centre). Un tel polyèdre est dit *hémisymétrique* (1).

La demi-forme directe subsiste tout entière, puisque toutes les rotations qui la produisent sont conservées; mais il n'y a plus de demi-forme inverse. La forme oblique est donc réduite à moitié ou *hémiédrique*. Suivant celle des deux faces inversement semblables qu'on choisit pour face déterminante, on obtient deux polyèdres conjugués. Ces polyèdres ne sont pas superposables; car s'ils l'étaient, ce ne pourrait être que par rotation autour d'un certain axe, qui serait commun au polyèdre et à l'assemblage; or tous les axes de ce dernier ont été conservés. Formés chacun des faces directement semblables entre elles, les polyèdres sont inverses l'un de l'autre ou *énantiomorphes*, chaque face de l'un étant symétrique d'une face de l'autre relativement à un plan. C'est l'*hémiédrie plagièdre* des cristallographes allemands.

Polyèdres hémiaxes et tétartoaxes. — Avec un polyèdre hémiaxe, la face déterminante n'accomplissant que la moitié des rotations, la demi-forme directe est réduite de moitié. Elle se compose donc de $\frac{N}{4}$ faces, si N était le nombre total des faces de la forme oblique complète. Suivant la face choisie, cette réduction donne lieu à deux polyèdres conjugués qui sont superposables, puisque l'un peut s'obtenir en faisant tourner l'autre autour de l'un des axes binaires déficients. Mais deux cas peuvent se présenter :

1° Le polyèdre hémiaxe est *centré*. Alors le centre occasionne le doublement des faces de la demi-forme; le nombre total devient $\frac{N}{2}$; la forme est donc *hémiédrique*.

2° Le polyèdre hémiaxe est *dichosymétrique*, c'est-à-dire que, dépourvu de centre, il possède du moins ceux des plans de symétrie qui ne sont pas normaux aux axes conservés et qui, par suite, peuvent coexister avec ces axes sans entraîner le rétablissement du centre. Le demi-forme, réduite à moitié, se double relativement à ces plans; le nombre total redevient encore $\frac{N}{2}$; la forme est *hémiédrique*.

3° Le polyèdre hémiaxe est *hémisymétrique*. Alors il n'y a plus que la demi-forme réduite à moitié, c'est-à-dire à $\frac{N}{4}$; la forme est donc *tétartoédrique*.

On verrait de même qu'un polyèdre tétartoaxe, ne permettant que le quart des rotations possibles et réduisant, par conséquent, la demi-forme directe à $\frac{N}{8}$, donne, quand il est *centré* ou *dichosymétrique*, des formes *tétartoédriques*

(1) Ce mot, comme ceux qui vont suivre, a été créé par Bravais.

et, quand il est *hémisymétrique*, des formes *hémitétartoédriques*, au-dessous desquelles il n'y a plus de réduction admissible. Un polyèdre tétartoaxe donne lieu d'ailleurs à quatre formes conjuguées et deux à deux superposables, qui, réunies ensemble et conservant chacune leur orientation propre, reproduisent la forme holoédrique.

Les polyèdres centrés engendrent la *parahémiédrie* ; les polyèdres dépourvus de centre, l'*antihémiédrie*. Mais on voit que ces diverses manières d'être rentrent dans une loi commune, et ne font que traduire les différences qui existent entre la symétrie des particules complexes et celle des assemblages. Quant à l'*hémimorphisme*, il n'est rien autre chose qu'un des cas particuliers de la loi générale de dérivation, celui où un axe d'ordre supérieur n'est accompagné ni d'axes binaires ni d'un centre.

Tableau résumé des diverses variétés de formes cristallines à symétrie élevée.

PARTICULES COMPLEXES		FORMES CRISTALLINES
HOLOAXES	CENTRÉES	holoédriques.
	HÉMISYMÉTRIQUES	hémiédriques.
HÉMIAXES	CENTRÉES	hémiédriques.
	DICHOSYMÉTRIQUES	hémiédriques.
	HÉMISYMÉTRIQUES	tétartoédriques.
TÉTARTOAXES	CENTRÉES	tétartoédriques.
	DICOHSYMÉTRIQUES	tétartoédriques.
	HÉMISYMÉTRIQUES	hémitétartoédriques.

Restriction aux formes obliques des réductions mériédriques. — Ici vient se placer une remarque d'une haute importance : c'est que les réductions qui viennent d'être énumérées ne *s'appliquent dans toute leur généralité qu'aux formes obliques*. Les formes restreintes peuvent, dans certains cas, n'éprouver aucune réduction par le fait de la symétrie incomplète de la particule.

Supposons que cette dernière soit dépourvue de centre et considérons une forme orthoparallèle, c'est-à-dire parallèle à un axe d'ordre pair. Puisqu'une rotation de 180° autour de cet axe engendre une face parallèle à la face déterminante, se confondant, par conséquent, avec celle que la symétrie centrale eût exigée, on peut, conservant l'axe en question, supprimer le centre sans que la forme s'en ressente. Dans ce cas, en effet, la demi-forme directe se confond avec la demi-forme inverse et la suppression de cette dernière ne produit aucun résultat. Ainsi, pour une forme orthoparallèle, l'influence d'un polyèdre holoaxe hémisymétrique ne se traduit par aucun signe extérieur. On s'explique facilement de cette manière que la généralité de l'hémiédrie ait échappé aux premiers

cristallographes. C'est à cause du nombre, relativement très grand, des formes restreintes, sur lesquelles cette hémiédrie demeurait à l'état latent. Par exemple, la pyrite de fer, qui est hémiédrique, offre fréquemment des formes cubiques et octaédriques complètes, parce que ni le cube ni l'octaèdre ne sont susceptibles d'être affectés par le défaut de symétrie du polyèdre particulaire de la pyrite. Dans ce cas, certaines propriétés physiques, telles que la pyroélectricité, viennent révéler la différence intrinsèque d'éléments qui, sur les deux formes, semblaient géométriquement identiques. Mais l'observation cristallographique ne peut faire connaître le degré de symétrie du polyèdre *que si l'on est en face de la forme oblique générale*.

C'est donc une locution vicieuse que celle qui consiste à représenter une substance comme susceptible à la fois de formes holoédriques et de formes mériédriques, comme si elle choisissait capricieusement les cas où elle s'écarte de la symétrie absolue. Une substance affecte des formes incomplètes, parce que la symétrie de son polyèdre particulaire n'est pas identique avec celle de l'assemblage. Ce défaut d'identité rentre dans l'une des variétés ci-dessus énumérées et se traduit *toujours de la même façon*, c'est-à-dire qu'une substance donnée n'offre jamais qu'un seul genre de formes mériédriques. Mais, suivant que les formes auxquelles doit s'appliquer la formule de réduction sont plus ou moins restreintes, le phénomène mériédrique est visible ou invisible.

Or c'est un fait d'observation, que plus la mériédrie d'une substance est prononcée, et plus le nombre des faces *dominantes* est restreint. Les formes qui se produisent sont presque toujours perpendiculaires aux axes ou aux plans de symétrie ; à tel point qu'il est certains corps cristallisés qu'on connaît exclusivement sous l'aspect d'une de ces formes normales simples. Ainsi la tendance à revêtir des formes restreintes serait plus grande chez les variétés mériédriques que chez les autres et contribuerait d'autant plus à rendre difficile la constatation de ce qui manque à la symétrie.

Coexistence possible des formes conjuguées. — Une autre cause contribue encore à masquer le phénomène de l'hémiédrie ; c'est la coexistence possible, *sur un même cristal*, des deux formes conjuguées auxquelles l'hémiédrie peut donner lieu. Quand un corps, dont la particule possède une symétrie incomplète, vient à cristalliser, les seules faces *aptes à se produire en même temps* sont bien celles qui, par leur ensemble, constitueraient la forme réduite, et, dès lors, un seul des polyèdres conjugués admissibles doit se produire *à un moment donné* de la cristallisation. Mais un cristal n'est pas exclusivement constitué par une forme simple ; il résulte le plus souvent de la combinaison de plusieurs formes, dont chacune, caractérisée par l'identité du plan réticulaire dans toutes ses faces, représente une *phase* déterminée de l'acte de la cristallisation. Dès lors, de même qu'un cube peut coexister avec un octaèdre, de même deux polyèdres conjugués, pouvant résulter, l'un et l'autre, de la réduction d'une même forme, par exemple sous l'influence d'une particule hémiaxe,

sont susceptibles de se présenter sur un même cristal, non comme parties *simultanées* d'un même tout, mais à titre de formes indépendantes et correspondant à deux phases distinctes. Parfois il arrivera que ces deux formes auront sur le cristal un égal développement, en sorte qu'elles lui donneront une apparence rigoureusement holoédrique. Mais, le plus souvent, ou l'un des deux polyèdres sera sensiblement moins developpé que l'autre, ou ses faces porteront des marques distinctives, telles que des stries, qui feront défaut sur l'autre. C'est ainsi que, sur les angles de certaines formes tétraédriques, le tétraèdre conjugué inverse apparaît à l'état de troncatures de peu d'étendue. On conçoit néanmoins que ces signes distinctifs ne soient pas toujours faciles à apprécier et l'on s'explique encore mieux ainsi comment l'hémiédrie a pu passer autrefois pour une anomalie de peu d'importance, puisque, entièrement masquée sur certaines formes restreintes, elle peut l'être aussi, sur la forme oblique, par l'existence simultanée (quoique à des titres différents) des formes partielles conjuguées.

Liaison intime entre le mode mériédrique et la nature de la substance. — Quoi qu'il en soit, puisque les formes mériédriques sont la manifestation du genre de symétrie propre à la particule complexe, une substance donnée, dont la particule ne semble pas pouvoir varier, ne peut offrir qu'un seul genre de mériédrie. C'est ce que les anciens cristallographes avaient bien reconnu. Ainsi ils avaient remarqué que la pyrite de fer est toujours parahémiédrique, le cuivre gris toujours antihémiédrique, et ils en concluaient que ces deux variétés sont incompatibles entre elles. Mais, faute d'une définition rigoureuse du phénomène, on avait été amené à proscrire à tort certaines combinaisons, par exemple celle de la forme dodécaédrique, réputée à faces parallèles, avec la forme tétraédrique, regardée comme nécessairement antihémiédrique. Bravais s'éleva contre cette exclusion, en montrant qu'il existait un genre particulier de symétrie qui admettait à la fois les deux formes et, quelques années plus tard, la découverte du chlorate de soude de Marbach venait fournir à cette induction géométrique une précieuse sanction, en montrant la coexistence des deux solides sur un même cristal.

Variétés de symétrie d'ordre réticulaire. — Cherchons maintenant à cataloguer les combinaisons de détail que peuvent réaliser, dans une particule complexe, ceux des éléments de symétrie qui lui sont communs avec les assemblages réticulaires.

1° En premier lieu viendra la combinaison terquaternaire complète, $3\Lambda^4$, $4L^3$, $6L^2$, C, 6P, 3Π, laquelle est aussi bien réalisable pour un polyèdre que pour un assemblage.

2° Si le polyèdre n'est pas centré, sa symétrie se réduira à

$$3\Lambda^4,\ 4L^3,\ 6L^2$$

car la présence de l'un quelconque des plans de symétrie, combinée avec un des axes d'ordre pair, suffirait à restituer le centre.

Mais la géométrie indique qu'au point de vue des axes, la combinaison $3L^2$ $4L^3$ se suffit à elle-même, en même temps qu'elle est indivisible, trois axes binaires rectangulaires de même paramètre entraînant fatalement $4L^3$ et réciproquement. On aura donc trois cas : ou bien

3° $3L^2$, $4L^3$, C, 3Π

ou bien :

4° $3L^2$, $4L^3$, 6P

ou enfin :

5° $3L^2$, $4L^3$

Maintenant, passant aux combinaisons sénaires, nous verrons, de la même façon, qu'on peut avoir :

6° Λ^6, $3L^2$, $3L'^2$, C, 3P′, 3P, Π
7° Λ^6, $3L^2$, $3L'2$
8° Λ^6, 3P, 3P′
9° Δ^6, C, Π
10° Λ^6

Les combinaisons ternaires nous donneront d'abord deux solutions dérivées d'une diminution admissible de la symétrie sénaire, savoir :

11° Λ^3, $3L^2$, 3P′, Π
12° Λ^3, Π

puis les solutions ternaires proprement dites :

13° Λ^3, $3L^2$, C, 3P
14° Λ^3, $3L^2$
15° Λ^3, C
16° Λ^3, 3P
17° Λ^3

Nous aurons de même, pour les combinaisons quaternaires :

18° Λ^4, $2L^2$, $2L'^2$, C, 2P, 2P′, Π
19° Λ^4, $2L^2$, $2L'^2$
20° Λ^4, C, Π
21° Λ^4, 2P, 2P′
22° Λ^4
23° Λ^2, $2L^2$, 2P′

Enfin les autres combinaisons admissibles seront :

24° L^2, L'^2, L''^2, C, P″, P′, Π
25° L^2, L'^2, $L''2$
26° L^2, P′, P″
27° L^2, C, Π
28° L^2

29°	Π
30°	C
31°	zéro.

En résumé, il y a 31 groupes de symétrie, d'ordre conforme à ceux des assemblages, qui peuvent être réalisés dans la *particule complexe*; et ces 31 variétés de particules sont obligées de choisir entre les sept assemblages réticulaires, seuls aptes à réaliser les exigences de la cristallisation.

Choix du mode de symétrie. — Ce choix peut être réalisé, soit au nom des exigences de la *symétrie élevée*, soit en raison de la *symétrie restreinte* que gouvernent les éléments-limites.

On voit alors qu'un réseau terquaternaire sera adopté, au titre de la *symétrie élevée*, par les groupes 1 à 5, et qu'il *pourra* être choisi, au titre de la *symétrie restreinte*, par tous les groupes 11 à 31.

De même un réseau sénaire conviendra, dans la même mesure, aux groupes 6 à 13, ainsi qu'aux groupes 14 à 17 et 23 à 31.

Aux réseaux quaternaires correspondront les groupes 18 à 23, et 24 à 31.

Les réseaux ternaires embrasseront les groupes 13 à 17 et 27 à 31. Enfin les combinaisons terbinaires se produiront pour les groupes 26 à 31, et les combinaisons binaires pour la série de 27 à 31.

Toutefois, plus la mériédrie est prononcée, c'est-à-dire plus la symétrie de la particule est pauvre relativement à celle d'un système réticulaire donné, moins on a de chances de voir se produire les conditions-limites qui pourraient procurer l'adoption d'un réseau de symétrie très supérieure. Donc, quelle que soit l'importance théorique des corps mériédriques à symétrie restreinte, on doit s'attendre à les rencontrer moins fréquemment que ceux de la catégorie à symétrie élevée. Ces derniers sont les seuls que nous considérerons dans la description des systèmes.

§ 4

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES FORMES CRISTALLINES

Perspectives diverses. Perspective sphérique. Sa justification. — La représentation graphique des formes cristallines se fait par voie de perspective. Lorsqu'on se propose de donner une idée nette de la figure extérieure d'un cristal, on emploie la perspective *isométrique* ou *cavalière*. Mais si l'on a en vue un mode de représentation permettant de définir avec rigueur, par des constructions géométriques faciles, les relations angulaires des faces, il est préférable de recourir à une perspective *sphérique*.

En effet, les faces des cristaux n'ayant pas de position déterminée, on peut les transporter toutes, parallèlement à elles-mêmes, de telle sorte qu'elles pas-

sent par un même point. Si, de ce point comme centre, on décrit une sphère d'un rayon arbitraire, les diverses faces seront des plans diamétraux, coupant cette sphère suivant des grands cercles et chacun de ces cercles pourra être considéré comme représentant une face.

Mais on peut faire mieux encore et réduire la représentation des faces à de simples points. La direction d'une face étant déterminée, celle de sa *normale* ou perpendiculaire ne l'est pas moins. Cette normale vient percer la sphère en un point, qui est éloigné de 90 degrés de tous les points du grand cercle représentatif de la face, et qu'on appelle le *pôle* de ce grand cercle. On peut donc, à la considération des faces, substituer celle de leurs pôles, et l'angle que font entre elles les normales à deux plans étant le supplément de l'angle dièdre de ces plans, la connaissance des distances angulaires des pôles équivaudra à celle des angles mutuels des faces.

En outre, si plusieurs faces font partie de la même zone, elles doivent, étant transportées en un même point, se couper toutes suivant une même ligne droite, qui est l'axe de la zone. Quant à leurs normales, qui toutes doivent être perpendiculaires à cette intersection commune, elles sont évidemment contenues dans un même plan, normal à l'intersection et coupant la sphère suivant un grand cercle. Ainsi toutes les faces formant zone ont leurs pôles situés sur un même grand cercle, qui est dit *cercle de zone*, et l'axe commun de la zone perce la sphère au pôle de ce grand cercle. La recherche des faces en zone revient donc à celle des points d'une sphère compris sur le même grand cercle.

En résumé, le problème à résoudre consiste à trouver un mode de représentation commode d'un système de points distribués sur une sphère. D'ailleurs, chaque normale ayant deux extrémités, on peut ne considérer que celles qui appartiennent à un même hémisphère et réduire la représentation cherchée à celle de la moitié d'une sphère.

Perspective stéréographique. — Cela posé, on peut représenter un hémisphère par une perspective, soit *gnomonique*, soit *stéréographique*. Dans le premier cas, chaque point de l'hémisphère est figuré par l'intersection du rayon, qui le joint au centre, avec un plan, tangent à l'hémisphère en son sommet. Dans le second, le point de vue est placé à l'extrémité V (fig. 35) du rayon perpendiculaire au grand cercle MN, qui forme la base de l'hémisphère, et c'est le plan de ce grand cercle qui sert de plan de perspective. Chaque point de la sphère, tel que A, est donc représenté par l'intersection *a*, avec le plan de perspective, dit *cercle fondamental*, de la ligne VA, qui joint ce point au point de vue et qui est le *rayon perspectif* de A.

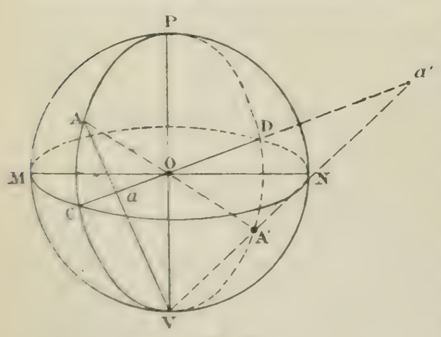


Fig. 35.

Nous nous servirons exclusivement de la perspective stéréographique, qui offre l'avantage de renfermer tous les éléments d'une forme dans un cercle, tandis que, dans la perspective gnomonique, les normales voisines du cercle fondamental de l'hémisphère ont leurs pespectives à l'infini. Occupons-nous maintenant de définir les principales propriétés de la perspective stéréographique (1).

Représentation des grands cercles. — En premier lieu, tout grand cercle passant par le point de vue V, tel que PACV, coupe le cercle fondamental MN suivant une ligne droite CD, qui est elle-même la perspective du grand cercle en question. En effet, tous les rayons perspectifs, tels que VA, se trouvant situés dans le plan même du grand cercle, ne peuvent couper le plan de perspective ailleurs que sur CD. Ainsi les lignes droites rayonnant autour du point O sont les perspectives de tous les grands cercles passant par PV et formant ce qu'on peut appeler les méridiens de la sphère considérée. En outre, un grand cercle quelconque, passant nécessairement par le centre O, ne peut couper le cercle MN que suivant un de ses diamètres, qui est à lui-même sa propre perspective ; par conséquent, *la perspective d'un grand cercle doit toujours couper le cercle fondamental en deux points diamétralement opposés.*

Enfin on démontre, en géométrie, qu'un cercle quelconque de la sphère, petit ou grand, a toujours pour perspective stéréographique un cercle (2).

D'après cela, il est facile de déterminer la perspective du grand cercle passant par deux points de la sphère, dont on connaît les perspectives. Pour cela, sachant que la courbe cherchée est un cercle et connaissant deux points par lesquels elle passe, il suffit d'en déterminer un troisième. On choisit pour ce troisième le point diamétralement opposé à l'un des deux points donnés. Soit A (fig. 35), l'un de ces points. Son rayon perspectif est VA. Si A' est le point situé à l'extrémité opposée du diamètre OA, son rayon perspectif VA' ira rencontrer en a' le prolongement de la ligne CD, dans le plan de laquelle il est évidemment contenu. On en déduit la construction suivante :

Soit a (fig. 36) la perspective donnée. Par O et a, on mène une ligne droite OaC, qui n'est autre que la perspective du grand cercle passant par le point de vue V et le point de l'espace dont a est la perspective. Si l'on rabat ce grand cercle, autour de CD comme charnière, sur le plan fondamental, a ne bougera pas ; le rayon perspectif viendra en Va (le point de vue s'étant rabattu à l'extrémité du diamètre perpendiculaire à CD) et, par suite, A_1, prolongement de Va, sera le rabattement du point A. Le point diamétralement opposé se rabattra en

(1) On trouve, dans le *Manuel* de Des Cloizeaux, un grand nombre de très belles planches gravées, où tous les éléments des formes des principales espèces sont représentés en perspective stéréographique.

(2) Il suffit, pour le voir, de considérer le cône ayant V pour sommet et le cercle de la sphère pour base. On s'assure que la section plane de cône par le cercle fondamental est exactement symétrique, relativement à l'axe, du plan de la base circulaire, à laquelle elle doit par conséquent être semblable.

A'_1. Donc, joignant VA'_1, on aura en a' la perspective du point opposé à A. Cette perspective tombera hors du cercle fondamental, puisque le point opposé à A est situé dans l'hémisphère inférieur.

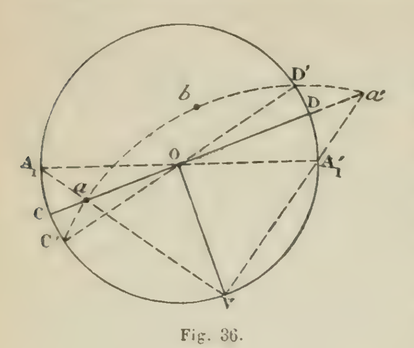


Fig. 36.

Cela posé, deux perspectives a et b étant données, pour connaître la perspective du grand cercle qui joint les points A et B de l'espace, il suffit de déterminer la perspective a' du point opposé à A et de faire passer un cercle par les points a, b, a'. Comme vérification, ce cercle devra couper le cercle fondamental en deux points C′ et D′ diamétralement opposés.

Pôles des cercles. Distance angulaire de deux points. — Proposons-nous maintenant de déterminer le *pôle d'un grand cercle*, c'est-à-dire le point où l'axe de la zone representée par ce grand cercle vient percer la sphère.

Soit CmD (fig. 37) le grand cercle donné. Si, par le milieu O du diamètre CD, nous menons OV perpendiculaire à CD, cette ligne sera la trace d'un grand cercle passant par le point de vue, et dont le plan sera normal à celui du grand cercle CmD. Le pôle cherché devra donc se trouver sur ce grand cercle OV et sa perspective tombera certainement entre O et V, en un point p tel que, sur la sphère, l'arc intercepté entre les points qui ont m et p pour perspectives soit égal à 90 degrés. Or si l'on rabat ce grand cercle mOV autour de OV comme charnière, le point correspondant à m se rabat en M, à l'extrémité du rayon Cm. Le pôle doit donc se rabattre sur MDV, en un point P dont la distance à M soit de 90 degrés, c'est-à-dire qu'on l'obtient en joignant OM et menant OP perpendiculaire sur OM. Il reste à joindre P à C, pour obtenir en p la perspective du pôle cherché.

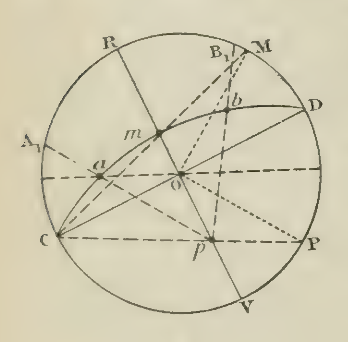


Fig. 37.

Observons maintenant que, C étant le pôle du grand cercle ROV, il a suffi de joindre ce pôle aux deux perspectives m et p pour obtenir en MDP, sur le cercle fondamental, la vraie grandeur de l'arc dont la perspective est mp. Or cette construction ne s'applique pas seulement au cas d'un grand cercle passant par le point de vue. On peut démontrer qu'elle est tout à fait générale, et que la vraie grandeur de l'arc compris entre deux points, dont les perspectives sont a et b, s'obtient en construisant la perspective p du pôle du cercle ab, en la joignant à a et à b et en prolongeant les deux lignes pa et pb jusqu'à leur rencontre, en A_1 et B_1, avec le cercle fondamental. A_1RB_1 est la distance angulaire cherchée.

Pour établir cette propriété, commençons par rappeler que *toute ligne qui passe par le point de vue et par un autre point A de la sphère a évidemment sa perspective réduite à celle a du point* A.

D'autre part, *toute ligne parallèle à une ligne passant par le point de vue et par A doit avoir pour perspective une ligne dont le prolongement passe en a.*

En effet, soit AV (fig. 38) la ligne passant par le point de vue V et par A,

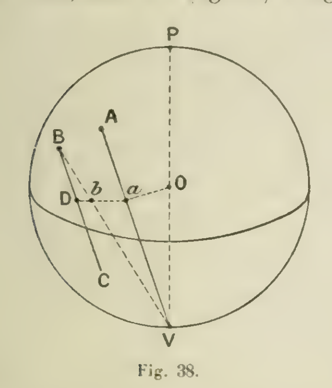


Fig. 38.

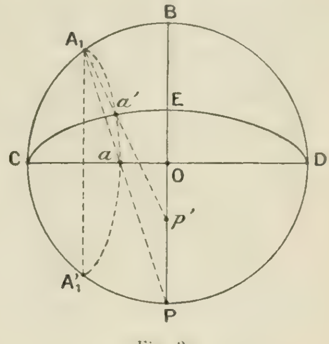


Fig. 39.

ligne dont la perspective est a, et soit BC la ligne parallèle, qui coupe le plan fondamental en D. Joignons BV. L'intersection de cette ligne avec le plan fondamental est la sperpective b de B Les trois lignes AV, BV, BC sont évidemment dans un même plan. Donc les trois points D, b, a sont en ligne droite, et par conséquent la perspective Db de BV passe en a.

En un mot, toutes les parallèles à AV formeraient, par leurs perspectives, un faisceau de lignes droites divergeant du point a.

Cela posé, soit COD (fig. 39) un grand cercle normal au cercle fondamental, et soit a la perspective d'un point de ce cercle. On sait que, si l'on joint P à a, on viendra tomber sur un point A_1, qui est le rabattement sur le cercle fondamental du point de la sphère représenté en a; c'est-à-dire qu'A_1B est la vraie grandeur de l'axe dont la perspective est aO.

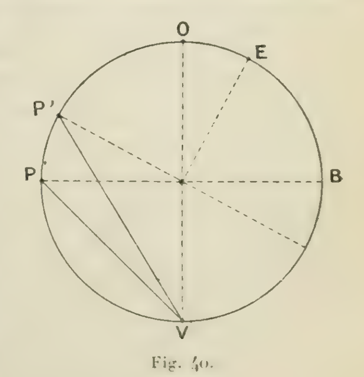


Fig. 40.

Si maintenant nous faisons tourner COD autour de CD, de manière à l'amener en CED, le point dont a est la perspective décrira pour venir en a' un petit cercle, dont le plan sera parallèle à celui du grand cercle POB, et qui devra passer à la fois en a, en A_1 et en son symétrique A'_1, puisque CA_1 est la vraie grandeur de l'axe Ca.

Représentons à part (fig. 40) le plan du cercle POB et (fig. 41) celui du petit cercle AaA. Joignons le pôle P au point de vue V, et menons par le point A de l'espace, qui correspond à a, une parallèle à PV, qui sera AA_1, (fig. 41). La

perspective de cette ligne (fig. 39) sera A_1a, et nous savons qu'elle passe en P. Si nous faisons tourner tout le système autour de CD comme charnière, le pôle P viendra en P′ (fig. 40), PV ayant décrit l'angle PVV′, et la parallèle prendra la position A_1A' (fig. 41), passant toujours en A_1, puisque l'angle AA′ doit être égal à PP′, et que $\frac{1}{2}$ AA′ est précisément la mesure de l'angle AA_1A', comme $\frac{1}{2}$ PP′ $= \frac{1}{2}$ OE (fig. 40) est celle de l'angle PVV′. Donc la parallèle à P′V continue à passer par A_1 et a'. D'autre part, en vertu du théorème précédent, sa perspective doit passer par celle p' du pôle déplacé. Donc les trois points A_1, a' et p' sont en ligne droite. Donc la jonction d'un pôle p' à un point a' du cercle correspondant détermine sur le cercle fondamental un point A_1 tel, que A_1B (fig. 39) soit la vraie grandeur de l'arc dont la perspective est aO.

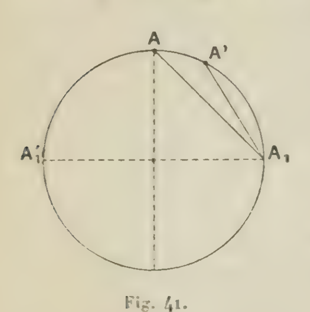


Fig. 41.

Cette construction donne le moyen de résoudre la question principale de la cristallographie, celle de la détermination de l'angle dièdre de deux faces, puisque cet angle est le supplément de l'angle des normales qui aboutissent aux pôles a et b des faces en question.

On résoudrait sans plus de difficulté la question inverse : déterminer la position de la perspective d'un pôle c, sachant que la face correspondante fait, avec deux autres faces a et b, des angles respectivement égaux à α et à β. Pour cela, on commencerait par déterminer, sur le grand cercle ab, de part et d'autre de a, deux points éloignés de a d'une distance angulaire égale à $\pi - \alpha$. On déterminerait un troisième point, situé sur le grand cercle aO, à la même distance angulaire de a et, en faisant passer un cercle par les trois points obtenus, on aurait la perspective du petit cercle de la sphère, décrit de a comme centre avec π-α pour ouverture angulaire. Un cercle semblable, décrit de b comme centre avec π-β pour ouverture, donnerait, par ses intersections avec le premier, deux points satisfaisant à la condition imposée.

Représentation des zones. Cercles et axes de zones. — Nous avons déjà fait ressortir l'importance que présente, en cristallographie, la considération des *zones*. Rappelons qu'une zone est l'ensemble de toutes les faces parallèles à une même direction, dite *axe de la zone*. Cela posé, il est clair que toutes les faces qui font partie d'une même zone sont telles que les perpendiculaires abaissées, du centre de la sphère de perspective, sur chacune d'elles, soient contenues dans un même plan, normal à l'axe de la zone. Ce plan coupe la sphère, ainsi qu'il a été dit, suivant un grand cercle, dit *cercle de zone*, sur lequel sont situés tous les pôles des faces en question. La série des plans, tangents à la sphère le long de ce grand cercle, et formant un cylindre, représen-

terait toutes les directions des plans appartenant à cette zone ; mais, parmi ces directions, celles-là seules correspondraient à des faces admissibles, qui seraient parallèles à des plans réticulaires du système.

Ainsi toutes les faces qui *sont en zone* ont leurs pôles sur un même grand cercle. Veut-on savoir si une face, donnée par son pôle c, fait partie de la zone définie par deux autres faces, dont les pôles sont a et b ? Il suffit de tracer le grand cercle ab et de vérifier s'il passe par le point c. Quant à l'axe de la zone ab, ce n'est autre chose que le diamètre parallèle aux deux plans tangents à la sphère, en a et en b, c'est-à-dire le diamètre *perpendiculaire au cercle de zone* ab. Ce diamètre perce la sphère au pôle du cercle ab, facile à déterminer, d'après une des constructions précédemment indiquées.

DEUXIÈME SECTION

ÉTUDE DES SYSTÈMES CRISTALLINS

CHAPITRE I

SYSTÈME TERQUATERNAIRE OU CUBIQUE (1)

§ I

NOYAU DE L'ASSEMBLAGE

Premier cas. Cube et cube centré. — Nous avons vu (2) que, dans tout système pourvu d'un axe quaternaire, la maille du plan normal à cet axe était un carré. Les côtés de ce carré pouvant être parallèles, soit aux axes binaires de première espèce, soit aux axes de deuxième espèce, il y a de ce chef deux hypothèses à examiner quand on passe au système terquaternaire; car alors les axes de première espèce deviennent quaternaires. La maille du carré de base peut donc être, ou parallèle aux axes quaternaires, ou parallèle aux axes binaires subordonnés. Admettons la première hypothèse.

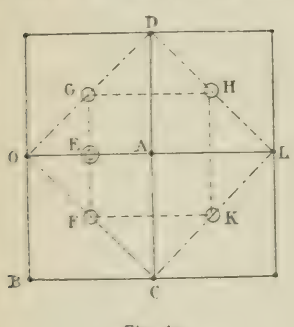


Fig. 42.

Les côtés OA et OB (fig. 42) du carré de base correspondent aux axes quaternaires. Il nous reste à examiner, en tenant compte d'un théorème déjà démontré (3), quelles positions peuvent occuper les projections orthogonales, sur le plan principal OAB, des nœuds du plan limitrophe. Appelons 1 et 2 les deux plans.

En premier lieu, les nœuds du plan 2 peuvent se projeter exactement sur ceux du plan 1. Alors, si l'on fait tourner le carré OACB de 90 degrés autour de l'axe quaternaire OB, après cette rotation, les nœuds A et C, projetés

(1) C'est le système *régulier* de quelques auteurs.
(2) V. plus haut, p. 52.
(3) V. plus haut, p. 51.

orthogonalement en O et B, doivent se confondre avec deux nœuds du plan 2. Donc ce dernier est à une distance du plan 1 marquée par le côté OA du carré. Donc *le noyau de l'assemblage est un cube.*

Mais les projections orthogonales des nœuds du plan 2 peuvent aussi tomber entre deux nœuds du plan 1. Ce ne peut être en E, au milieu du côté OA; car la normale en E serait une rangée parallèle à l'axe quaternaire; elle devrait donc être elle-même un axe quaternaire, ce qui n'est pas possible, une rotation de 90 degrés autour de E n'amenant le nœud O en coïncidence avec aucun autre. Une seule position est admissible; c'est le milieu F de la diagonale OC, auquel cas le réseau 2 se complète par l'adjonction des nœuds F, G, H, K, formant un carré identique avec OABC. D'autre part les nœuds du plan n° 3 doivent toujours coïncider en projection avec ceux du plan 1. Donc ces nœuds seront engendrés par une rotation de 90 degrés, imprimée à OABC autour de OB. Donc l'intervalle des plans 1 et 2 est égal à la moitié de OA. Par suite, si un assemblage admettait des parallélépipèdes pourvus de nœuds dans leur intérieur, on pourrait dire que, dans ce cas, *le noyau est un cube centré*, c'est-à-dire portant un nœud en son centre, indépendamment de ceux qui occupent ses sommets. Mais considérons quatre cubes centrés juxtaposés (fig. 43) et joignons leurs quatre centres aux extrémités ABCD des trois arêtes communes à trois de ces cubes. Nous formerons ainsi un parallélépipède n'ayant pas de nœuds à l'intérieur. Les faces de ce parallélépipède seront des losanges, puisque toutes les arêtes sont égales à la moitié de la diagonale d'un cube et, quant aux diagonales de ces losanges, l'une étant le côté du cube générateur, l'autre est justement égale à la diagonale d'une face cubique. Le solide résultant, formé de six rhombes égaux, s'appelle un *rhomboèdre* et l'on peut s'assurer que les faces s'assemblent trois par trois autour d'un centre cubique, en formant entre elles des angles de 120°. Ainsi, dans l'assemblage cubique centré, le véritable noyau parallélépipédique est un rhomboèdre de 120°, dont toutes les arêtes sont parallèles aux axes ternaires de l'assemblage, tandis que les courtes diagonales des faces sont les axes quaternaires et que les longues diagonales coïncident avec les axes binaires.

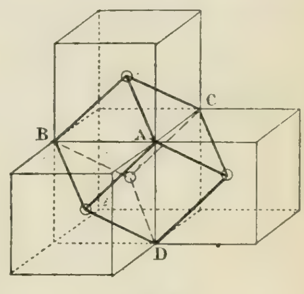


Fig. 43.

Deuxième cas. Cube à faces centrées. — Les axes quaternaires sont OD et OC (fig, 42). Alors, comme une rotation de 90°, imprimée à OAC autour de OC, amène le nœud A au-dessus de F, la seule position admissible, pour les nœuds du plan 2, est que leurs projections orthogonales tombent sur les milieux F des carrés de base OACB. Dans ce cas, on peut considérer le noyau comme engendré par la rotation, autour de OC, du carré centré OCLDA. Il en résulte *un cube à faces centrées*, c'est-à-dire portant, outre les nœuds des som-

mets, un nœud au centre de chaque face. Or si, dans un tel cube (fig. 44), on joint deux sommets A et B, diagonalement opposés, aux centres des six faces, on obtient des losanges, ayant pour côté la demi-diagonale des faces cubiques, et engendrant, par leur juxtaposition autour d'un sommet cubique, un rhomboèdre dont l'angle, ainsi qu'on peut s'en assurer, est de 70°32′. Les arêtes de ce rhomboèdre sont parallèles aux axes binaires, puisqu'elles sont dirigées suivant les diagonales des faces cubiques, et les diagonales du même rhomboèdre sont parallèles aux axes quaternaires.

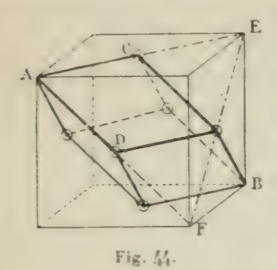


Fig. 44.

En résumé, le système terquaternaire est susceptible de trois modes distincts, caractérisés par un noyau cubique et deux noyaux rhomboédriques, mais qui tous trois peuvent être rattachés à la constitution cubique, sous les noms de cube simple, cube centré et cube à faces centrées. Telle est la raison pour laquelle l'assemblage terquaternaire peut, en toute généralité, être qualifié d'*assemblage cubique*.

Application aux trois modes de la même série de formes. — Remarquons maintenant que cette addition de nœuds, aux centres des cubes ou sur les milieux des faces, *ne change rien à la direction des plans réticulaires que comporte l'assemblage.* Pour le démontrer, il suffit de faire voir que cette intercalation ne fait naître aucune direction nouvelle de rangées. Soient (fig. 45) n et n' deux nœuds supplémentaires. Par définition, n occupe le milieu de l'intervalle NN_1 de deux nœuds anciens. Par conséquent si, par n', on mène une ligne parallèle à NN_1, cette ligne rencontrera deux nœuds N' et N'_1, tels que $N'N'_1 = NN_1$. Donc la rangée nn', obtenue en joignant deux nouveaux nœuds, est simplement parallèle aux rangées anciennement existantes NN', $N_1 N'_1$, dont elle ne fait que doubler le nombre. De même, joignons un nœud supplémentaire n à un nœud déjà existant N'_1. Puisque n occupe le milieu d'un certain intervalle paramétrique NN_1, nous pouvons achever le parallélogramme $NN'_1 N_1 N'_2$, avec la certitude de trouver en N'_2 un nœud ancien. Donc la ligne $N_1 N'_2$ qui coïncide avec $N'_1 n$, est une rangée déjà existante.

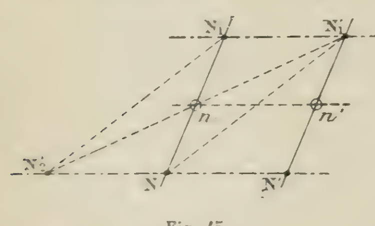


Fig. 45.

Ainsi l'addition de nœuds intercalaires peut bien enrichir certains systèmes de rangées; mais elle n'en introduit pas de nouveaux; elle ne change donc rien à la direction des plans réticulaires possibles et, par suite, nous pourrons procéder à la recherche des formes de l'assemblage terquaternaire, sans nous préoccuper de savoir lequel des trois modes possibles est actuellement réalisé.

Paramètres cubiques. — Le noyau de l'assemblage cubique étant un cube, les paramètres cristallographiques de l'assemblage doivent se déduire des lon-

gueurs relatives qui, sur les divers éléments géométriques de ce cube, séparent les nœuds, c'est-à-dire les centres de gravité particulaires.

Prenons pour unité la longueur des arêtes du cube. Ce sera le paramètre des axes quaternaires. Quant aux axes ternaires, nous savons que ce sont les diagonales du cube. Dans le cas du cube simple, comme dans celui du cube à faces centrées, la longueur de la diagonale, égale, comme on sait, à $\sqrt{3}$, exprime le paramètre des axes ternaires. Mais, pour le cube centré, un nœud s'intercale au milieu de la diagonale. Le paramètre devient donc $\frac{\sqrt{3}}{2}$.

Les axes binaires, représentés par les diagonales des faces du cube, ont évidemment pour paramètres, dans le premier comme dans le deuxième cas, $\sqrt{2}$ et, dans le troisième cas, $\frac{\sqrt{2}}{2}$. On a donc :

AXES	ASSEMBLAGE CUBIQUE		
	SIMPLE	CENTRÉ	A FACES CENTRÉES
quaternaires	1	1	1
ternaires	$\sqrt{3} = 1,732$	$\frac{1}{2}\sqrt{3} = 0,866$	$\sqrt{3} = 1,732$
binaires	$\sqrt{2} = 1,414$	$\sqrt{2} = 1,414$	$\frac{1}{2}\sqrt{2} = 0,707$

Position des éléments de symétrie dans le noyau cubique. — Nous savons que, dans un assemblage réticulaire, les éléments de symétrie n'ont pas de position spéciale et forment autant de groupes semblables qu'il y a de nœuds. Mais si nous considérons à part le noyau cubique élémentaire, il y a intérêt à définir la situation que prennent, par rapport aux données géométriques qui le définissent, les centre, axes et plans.

Le *centre* de symétrie coïncide avec le centre O (fig. 46) du cube, où se

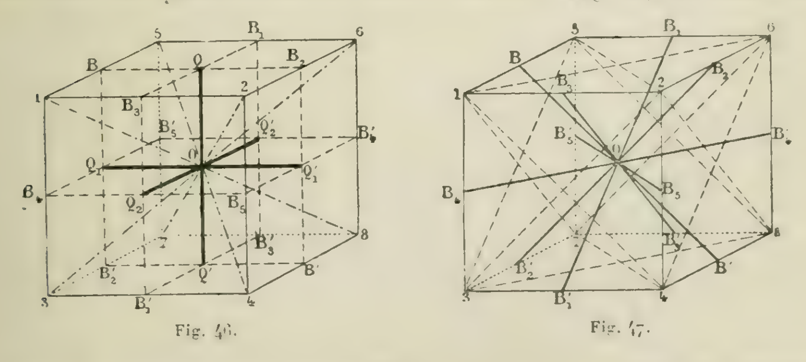


Fig. 46. Fig. 47.

croisent les trois *axes quaternaires* QQ', $Q_1Q'_1$, $Q_2Q'_2$, respectivement parallèles aux trois systèmes d'arêtes du cube. Ces trois axes, pris deux à deux, défi-

nissent trois plans, tels que $QBQ_1B'_2$ $Q'B'Q'_1B_2$, parallèles aux trois couples de faces du cube et qui sont les *plans principaux* de symétrie. Les *axes ternaires* sont les quatre diagonales du cube, savoir 1 — 8, 2 — 7, 6 — 3, 5 — 4. Les *axes binaires*, au nombre de six, sont les bissecteurs des angles droits formés par les axes quaternaires. Ce sont donc (fig. 47) les lignes BB', $B_1B'_1$, $B_2B'_2$, $B_3B'_3$, $B_4B'_4$, $B_5B'_5$, dont chacune, joignant les milieux de deux arêtes cubiques opposées par le centre, est à 45° des deux arêtes de la face cubique, à une diagonale de laquelle elle est parallèle. Enfin les *plans de symétrie non principaux*, bissecteurs des angles dièdres des plans principaux, sont les six plans diagonaux du cube, dont chacun, tel que 1584, est à 45° des deux faces cubiques auxquelles aboutit chacune de ses extrémités.

On remarquera qu'en joignant les milieux des arêtes du cube, par exemple en formant le contour $BB_4B'_1B'B'_4B$, on dessine un hexagone régulier plan, qui contient trois axes binaires, et dont le plan est perpendiculaire à l'axe ternaire qui va de O à 2 et à 7. Ce plan est d'ailleurs parallèle à celui qu'on obtiendrait en joignant, par un contour équilatéral, les sommets 1, 4 et 6.

§ 2

FORME OBLIQUE DU SYSTÈME

Choix des axes. Perspective du système. — Choisissons pour axes des coordonnées les trois axes quaternaires, qui sont trois rangées de même paramètre, de telle sorte qu'on peut poser

$$a = b = c = 1.$$

Une face (qrs) interceptera, sur les trois axes, des longueurs exactement proportionnelles à $\frac{1}{q}, \frac{1}{r}, \frac{1}{s}$.

Ainsi, grâce à l'égalité des paramètres, les nombres q, r, s ne sont plus seulement les inverses des coordonnées numériques des intersections, ce sont aussi, proportionnellement du moins, les inverses des longueurs d'intersection elles-mêmes.

Nous établirons la perspective stéréographique du système (fig. 48) en choisissant pour plan fondamental l'un des trois plans principaux. Des trois axes quaternaires, l'un aura pour perspective le centre z du cercle, perspective du pôle (001) de ce même cercle, tandis que les deux autres, zx et zy, aboutiront l'un en $x = (100)$, l'autre en $y = (010)$.

Chacun des plans de symétrie non principaux étant bissecteur de l'angle de deux plans principaux, il en est deux dont les perspectives sont les bissectrices des angles de $x\bar{x}$ avec $y\bar{y}$. Quant aux autres, dont deux doivent passer en x et $\bar{x}$

et les deux autres en y et $\bar{y}$, il suffit d'en obtenir un point intermédiaire, tel que B, qui est en même temps la perspective de l'extrémité d'un axe binaire. Pour cela, le point B devant être à 45° de z et de y, il suffira, d'après les règles connues de la perspective stéréographique, de joindre $\bar{x}$, pôle du cercle $\bar{y}y$, à A = 110, point situé à 45° de y. La ligne $\bar{x}$A coupera la ligne zy au point B cherché, et il restera à faire passer un cercle par $\bar{x}$, B et x. On s'assure sans peine que le centre de ce cercle doit être au point $\bar{y}$. En effet, l'angle $\bar{x}B\bar{y}$ a pour mesure $\frac{2}{1}(\bar{x}\bar{y} + Ay) = \frac{2}{3} \times 45°$. Mais si l'on joint $\bar{x}$ à $\bar{y}$, l'arc $\bar{y}\,x\,A$ a aussi pour mesure $\frac{2}{3} \times 45°$. Donc le triangle $\bar{x}\,\bar{y}$ B est isocèle; par suite, la perpendiculaire menée à $B\bar{x}$ par le centre de cette ligne, et qui doit rencontrer $B\bar{y}$ au centre cherché, aboutit nécessairement au point $\bar{y}$.

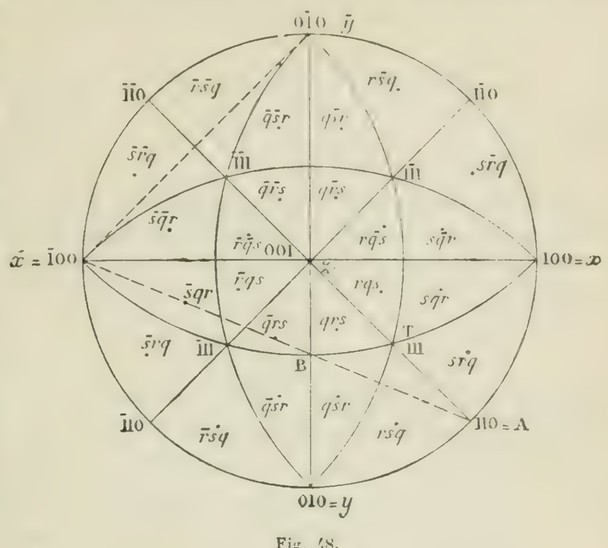


Fig. 48.

Les plans de symétrie se coupent trois à trois aux points tels que T = 111, en sorte que les axes ternaires sont zT, z. 1$\bar{1}$1, z. $\bar{1}\bar{1}$1, z. $\bar{1}$11.

Il s'agit maintenant de déterminer la place des divers pôles de la forme oblique. A chacun de ces pôles nous appliquerons les caractéristiques de la face correspondante, tangente à la sphère au point dont ce pôle est la perspective. Ainsi (qrs) sera écrit à côté du pôle de la face qui coupe l'axe des x à la distance $\frac{1}{q}$, l'axe des y à la distance $\frac{1}{r}$, l'axe des z à la distance $\frac{1}{s}$.

Convenons que l'octant xyz contiendra les coordonnées positives et prenons pour règle de choisir, comme face déterminante de la forme oblique générale, celle dont les trois coordonnées q, r, s sont positives et rangées en ordre ascendant. Pour cela, il faudra que le pôle qrs tombe dans le triangle BTz. En effet, imaginons le plan tangent à la sphère, mené par un des points contenus dans ce triangle. Il coupera évidemment l'axe des x plus loin que l'axe des y, car, pour qu'il les rencontrât tous deux à la même distance, il faudrait qu'il fût situé sur l'arc Tz. Donc on a :

$$\frac{1}{q} > \frac{1}{r} \text{ ou } q < r.$$

D'autre part, les points de BTz étant situés entre le plan principal zx et le plan bissecteur BTx du dièdre de zx avec le plan du dessin, l'axe des z est coupé plus près de l'origine que les deux autres.

Donc $$\frac{1}{s} < \frac{1}{r} \text{ ou } s > r.$$

D'où $$q < r < s.$$

Principe de la recherche des pôles homologues. — Nous allons maintenant chercher tous les pôles homologues de celui qui représente la face qrs. Pour cela, nous nous souviendrons que le nombre de ces pôles, donné par la formule

$$2 \times (1 + 3 \times 3 + 2 \times 4 + 6),$$

est de 48, dont 24 constituant la demi-forme directe et 24 la demi-forme inverse. Occupons-nous d'abord de la première. Nous en obtiendrons évidemment tous les pôles en faisant tourner successivement le pôle qrs, des angles voulus, autour des divers axes de symétrie. Mais on peut simplifier cette recherche. En effet, deux faces directement semblables à une troisième devant être directement semblables entre elles, on peut, après avoir obtenu certains pôles, homologues de qrs, les faire tourner eux-mêmes autour d'axes convenablement choisis et, quand on aura, de cette manière, obtenu 24 faces, dont 12 dans l'hémisphère représenté, on sera sûr d'avoir toute la partie de la demi-forme qui appartient à cet hémisphère. Il convient alors de choisir les rotations de manière à réaliser le plus simplement possible la transformation des caractéristiques q, r, s, lesquelles, étant rapportées à trois axes de symétrie, identiques entre eux, ne peuvent que permuter ensemble et changer de signes, sans que leur valeur absolue soit affectée.

Séparation systématique des éléments de symétrie. — Pour cristalliser dans le système terquaternaire, une particule cristalline doit posséder au minimum trois axes binaires de même espèce, rectangulaires entre eux, et quatre axes ternaires, disposés comme ceux de l'assemblage. Nous allons donc chercher les homologues directs de qrs, relativement aux axes quaternaires, considérés seulement comme binaires, puis relativement aux quatre axes ternaires.

Si l'on fait tourner le système de 180° autour de l'axe des x (fig. 49), ce dernier ne changera pas, la partie positive de l'axe des y se substituera à la partie négative et il en sera de même pour l'axe des z. Donc la longueur $\frac{1}{q}$, interceptée sur l'axe des x, restera la même, tandis que $\frac{1}{r}$ et $\frac{1}{s}$ deviendront $-\frac{1}{r}$ et $-\frac{1}{s}$. Le symbole de la face obtenue par cette rotation sera donc $q\bar{r}\bar{s}$. On verrait de même qu'une rotation autour de l'axe y donnerait le pôle $\bar{q}r\bar{s}$ et, autour de l'axe z,

le pôle $\bar{q}\bar{r}s$. De ces pôles, le premier qrs et le dernier sont seuls dans l'hémisphère supérieur. Maintenant, faisons tourner chacun de ces quatre pôles de 120° autour des axes ternaires compris dans les mêmes octants de la sphère. Une telle rotation substitue simplement x à y, y à z et z à x, c'est-à-dire que les caractéristiques subissent une *permutation tournante*. Ainsi qrs tournant autour de l'axe 111, donne rsq et sqr. De même $q\bar{r}\bar{s}$ donnera $r\bar{s}\bar{q}$ et $s\bar{q}\bar{r}$, etc. On peut donc, sous la rubrique $3L^2$, $4L^3$, former un groupe comprenant douze pôles directement semblables, répartis en trois séries autour de chacune des positions du premier octant.

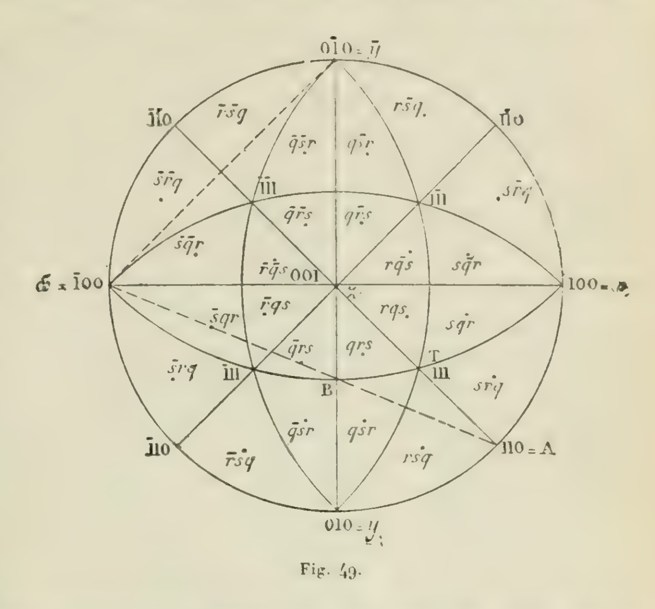


Fig. 49.

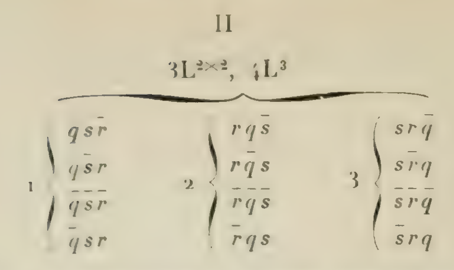
I

$3L^2$, $4L^3$

1	qrs	2	rsq	3	sqr
	$q\bar{r}\bar{s}$		$r\bar{s}\bar{q}$		$s\bar{q}\bar{r}$
	$\bar{q}r\bar{s}$		$\bar{r}s\bar{q}$		$\bar{s}q\bar{r}$
	$\bar{q}\bar{r}s$		$\bar{r}\bar{s}q$		$\bar{s}\bar{q}r$

Mais nous n'avons ainsi que la moitié de la demi-forme. Pour l'avoir entière, il faut maintenant restituer aux axes quaternaires la totalité de leur symétrie. Si l'on fait tourner qrs de 90° autour de l'axe x, en se dirigeant de y vers $\bar{z}$, on trouvera que x ne change pas, tandis que z se substitue à y et y à $\bar{z}$. Donc les nouvelles caractéristiques sont $qs\bar{r}$, ce qui revient à permuter ensemble les deux dernières caractéristiques, en changeant le signe de la dernière. Effectuant cette transformation pour chacune des douze faces déjà obtenues, on forme un nouveau groupe.

UNIVERSITAS SCIENTIAE 1818



De cette manière, nous possédons 24 faces, toutes directement semblables entre elles et qui, par suite, composent la demi-forme directe. Quant à la demi-forme inverse, puisque chacune de ses faces est opposée par le centre à l'une des faces de la demi-forme directe, on l'obtiendra simplement en changeant tous les signes des deux tableaux I et II, ce qui donnera deux nouveaux tableaux, III et IV. Or l'existence simultanée du centre et des axes $3L^2$ impliquant celle des plans principaux, le tableau III exprimera en réalité la symétrie relativement aux plans $3P^4$. On peut donc l'intituler $C, 3P^4$. Quant au dernier, résultant d'une combinaison du centre avec une rotation de 90° autour des axes quaternaires, il équivaut à l'affirmation de l'existence des plans non principaux $6P^2$. Il peut donc porter comme titre $C, 6P^2$.

Résumé. Analyse de l'hexoctaèdre. — En résumé, le tableau des 48 faces de la forme oblique générale peut être dressé comme il suit :

DEMI-FORME DIRECTE		DEMI-FORME INVERSE	
I $3L^2.4L^3$	II $3L^{2\times 2}, 4L^3$	III $C, 3P^4$	IV $C, 6P^2$
$q\,r\,s$ $q\,\bar{r}\,\bar{s}$ $\bar{q}\,r\,\bar{s}$ $\bar{q}\,\bar{r}\,s$	$q\,s\,\bar{r}$ $q\,\bar{s}\,r$ $\bar{q}\,\bar{s}\,\bar{r}$ $\bar{q}\,s\,r$	$\bar{q}\,\bar{r}\,\bar{s}$ $\bar{q}\,r\,s$ $q\,\bar{r}\,s$ $q\,r\,\bar{s}$	$\bar{q}\,\bar{s}\,r$ $\bar{q}\,s\,\bar{r}$ $q\,s\,r$ $q\,\bar{s}\,\bar{r}$
$r\,s\,q$ $r\,\bar{s}\,\bar{q}$ $\bar{r}\,s\,\bar{q}$ $\bar{r}\,s\,q$	$r\,q\,\bar{s}$ $r\,\bar{q}\,s$ $\bar{r}\,\bar{q}\,\bar{s}$ $\bar{r}\,q\,s$	$\bar{r}\,\bar{s}\,\bar{q}$ $\bar{r}\,s\,q$ $r\,\bar{s}\,q$ $r\,s\,\bar{q}$	$\bar{r}\,\bar{q}\,s$ $\bar{r}\,q\,\bar{s}$ $r\,q\,s$ $r\,\bar{q}\,\bar{s}$
$s\,q\,r$ $s\,q\,\bar{r}$ $s\,q\,\bar{r}$ $\bar{s}\,\bar{q}\,r$	$s\,r\,\bar{q}$ $s\,\bar{r}\,q$ $\bar{s}\,\bar{r}\,\bar{q}$ $s\,r\,q$	$\bar{s}\,\bar{q}\,r$ $\bar{s}\,q\,r$ $s\,\bar{q}\,r$ $s\,q\,\bar{r}$	$\bar{s}\,\bar{r}\,q$ $\bar{s}\,r\,\bar{q}$ $s\,r\,q$ $s\,\bar{r}\,\bar{q}$

La forme oblique du système terquaternaire comporte, comme on peut s'en assurer sur la figure 49, des pointements à huit faces autour des axes quaternaires, à six faces autour des axes ternaires, à quatre faces autour des axes binaires. Chaque face, telle que *qrs*, n'en rencontre que trois autres, *rqs*, *qsr*, $\bar{q}rs$. Elle a donc la forme d'un triangle, dont les côtés sont tous situés dans les plans de symétrie. D'ailleurs les triangles se groupent six par six dans chaque octant, de telle sorte que la forme peut être considérée comme un octaèdre, dont chaque face aurait été remplacée par une pyramide sextuple. De là le nom, qui lui a été donné, d'*hexoctaèdre*, synonyme de *solide à 48 faces*. On peut aussi, en prenant pour point de départ le groupement de huit triangles autour d'un axe quaternaire, la regarder comme un cube, dont chaque face aurait été remplacée par une pyramide à huit pans. Suivant que cette dernière est plus ou moins surbaissée, la figure du polyèdre s'éloigne plus ou moins de l'apparence d'un cube.

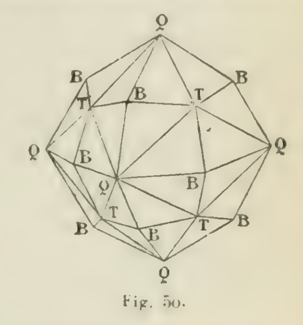


Fig. 50.

La figure 50 représente un hexoctaèdre. Les axes quaternaires aboutissent aux points Q, les axes ternaires aux points T, les axes binaires aux points B. On voit ainsi que chaque point B est le centre d'un losange, chaque point T le centre d'un hexagone d'apparence triangulaire, chaque point Q le centre d'un octogone quadratique.

A chacun des côtés des 48 triangles qui constituent les faces de l'hexoctaèdre (*qrs*) correspondent des valeurs spéciales pour l'angle dièdre de deux faces triangulaires adjacentes. Ces angles dièdres se calculent à l'aide des formules suivantes :

1° Pour l'arête qui va d'un pointement quaternaire (IV) au pointement ternaire (III) : $\cos x = \frac{s^2 + 2qr}{q^2 + r^2 + s^2}$. — Pour l'arête qui va du pointement quaternaire (IV) au pointement binaire (II) : $\cos y = \frac{s^2 + r^2 - q^2}{q^2 + r^2 + s^2}$. — 3° Pour l'arête qui va du pointement ternaire (III) au pointement binaire (II) : $\cos z = \frac{q^2 + 2rs}{q^2 + r^2 + s^2}$.

Ces formules sont établies dans l'hypothèse $q < r < s$.

Les hexoctaèdres les plus fréquents sont indiqués dans le tableau suivant, avec les valeurs de leurs angles dièdres, énumérés dans le même ordre que précédemment :

HEXOCTAÈDRES	DIÈDRES		
	$x =$ IV à III	$y =$ IV à II	$z =$ III à II
(*qrs*) — (123) . . .	158°13′	149°	158°13′
(124) . . .	162°15′	154°47′	144°3′
(134) . . .	147°48′	157°23′	164°3′
(135) . . .	152°20′	160°32′	152°20′
(137) . . .	158°47′	165°2′	136°47′

Représentation terquaternaire de la particule complexe. — La connaissance que nous avons de l'hexoctaèdre va nous permettre de donner une représentation géométrique précise de ce que peut être la particule complexe ou ***particule cristalline*** d'un cristal cubique holoédrique.

Cette particule possédant tous les éléments de symétrie de l'assemblage, si, par son centre de gravité, nous faisons passer ces divers éléments et qu'autour de ce centre nous concevions une sphère, celle-ci sera coupée par les éléments de symétrie comme l'est, dans la figure 48, la sphère représentative de l'hexoctaèdre. Chaque triangle devient la base sphérique d'une pyramide dont le sommet coïncide avec le centre de symétrie, dont les trois faces planes sont respectivement un plan principal et deux plans ordinaires de symétrie, enfin qui a pour arêtes un axe quaternaire, un axe ternaire et un axe binaire.

Cette pyramide délimite donc un espace à l'intérieur duquel ne se trouve aucun élément de symétrie. Si nous y installons, d'une façon quelconque, un groupe de molécules chimiques d'un corps susceptible de symétrie cubique, ce groupe formera exactement la *particule fondamentale*; et celle-ci, répétée relativement aux éléments de symétrie qui définissent le contour de la pyramide, engendrera les autres positions, dont l'ensemble constitue la *particule complexe*.

Ainsi la particule complexe d'un cristal cubique doit être conçue comme formée de quarante-huit alvéoles ou particules fondamentales, chacune occupant l'intérieur de l'une des 48 pyramides groupées autour du centre. 24 de ces particules sont identiques entre elles, mais diffèrent par leurs orientations ; ce sont celles qui correspondent aux 24 triangles dérivés directement de *qrs* par rotation autour des axes. Les 24 autres, aussi identiques entre elles, sont aux premières ce qu'un objet est à son image vue dans un miroir.

D'une façon générale, dans quelque système de symétrie que ce soit, la représentation de la particule complexe comporte simplement l'installation d'une particule fondamentale dans chacun des alvéoles polyédriques entre lesquels se divise la sphère représentative de la forme générale oblique.

Si, au lieu de choisir la sphère, on prend le noyau même de l'assemblage, ici le noyau cubique, les éléments de symétrie, menés par le centre et prolongés jusqu'à la rencontre des faces du cube, engendreront 48 cellules polyédriques, dont chacune est une pyramide ayant pour sommet le centre, pour base un triangle rectangle isocèle formant la huitième partie d'une face du cube, et, pour arêtes culminantes, un axe quaternaire, un axe ternaire et un axe binaire. Chacune de ces cellules, qui abrite une particule fondamentale, constitue, dans le système cubique, le *domaine fondamental* de M. Schœnflies, l'ensemble des 48 cellules formant le *domaine complexe* du même auteur.

§ 3

FORMES RESTREINTES DU SYSTÈME CUBIQUE

I. — *FORMES PARALLÈLES*

Forme parallèle aux axes quaternaires. Tétrahexaèdre. — La face déterminante de la forme doit être parallèle à un axe quaternaire, par exemple à l'axe des x, 100. Donc son intersection avec cet axe est située à l'infini, ce qui donne $\frac{1}{q} = \infty$ ou $q = 0$. Le symbole de la forme sera $\{ors\}$. Le pôle ainsi défini ne peut être que sur le cercle zy, qui est normal à l'axe 100 (fig. 51). Les pôles conjugués doivent tous tomber dans les plans principaux de symétrie, dont chacun est perpendiculaire à un axe quaternaire. La forme comprend huit pôles dans chaque plan principal, se groupant par quatre autour des axes quaternaires, et par six autour des axes ternaires, tandis que les faces correspondantes se rencontrent deux par deux ou en biseau sur les axes binaires.

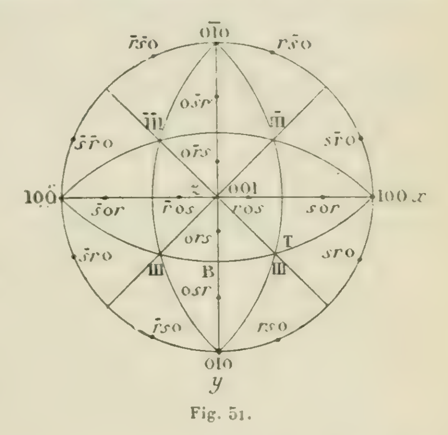


Fig. 51.

Chaque face, telle que *ors*, en rencontre trois autres, *osr*, *ros*, $\bar{r}os$. Ces intersections sont d'ailleurs situées dans les plans de symétrie secondaires et sont symétriques les unes des autres. Chaque face forme ainsi un triangle isocèle. De plus, deux triangles contigus *ors*, *osr*, se touchent sur un axe binaire, suivant un biseau évidemment parallèle à l'axe quaternaire 100. Donc les quatre triangles groupés autour de chaque sommet quaternaire dessinent une pyramide à base carrée, et les bases de ces six pyramides engendrent, par leur réunion, un cube parfait. La forme résultante est un *cube pyramidé* ou *tétrahexaèdre* (1) (fig. 52). Les arêtes, au nombre de 36, sont toutes situées dans les plans de symétrie secondaires.

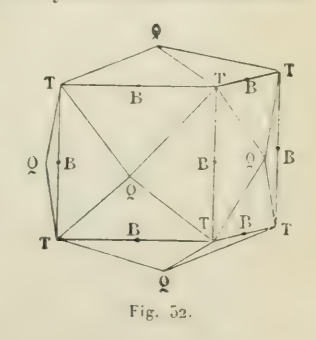


Fig. 52.

(1) On donne souvent à cette forme le nom d'*hexatetraèdre*. Il nous a paru qu'il y avait lieu de réserver ce nom pour une forme mériédrique, qui est bien réellement un tétraèdre à pointements sextuples.

Si, dans le tableau des 48 faces de la forme générale (qrs), on remplace q par zéro, on reconnaît que la première colonne devient identique avec la troisième, tandis que la seconde est reproduite par la quatrième.

Un tétrahexaèdre (ors) a deux sortes de dièdres : ceux des arêtes concourant aux pointements quaternaires, donnés par la formule $\cos x = \frac{s^2}{r^2 + s^2}$, et ceux des arêtes cubiques, avec $\cos y = \frac{2rs}{r^2 + s^2}$. Les tétrahexaèdres les plus fréquents sont (012), (025), (013), (014), pour lesquels les dièdres ont respectivement pour valeurs : 143°8′ et 143°8′ ; 149°33′ et 133°36′ ; 154°9′ et 126°52′ ; 160°15′ ; et 118°4′.

Forme parallèle aux axes ternaires. — La forme parallèle aux axes ternaires ne perd aucune de ses faces, les axes en question n'étant pas d'ordre pair. C'est donc un hexoctaèdre. Mais les caractéristiques q, r, s y doivent être assujetties à une équation de condition. Pour la trouver, remarquons que, si le pôle de la face déterminante doit se trouver dans le triangle B*Tz* (fig. 53), l'axe auquel la face est parallèle ne peut être que celui dont la perspective aboutit en $\bar{1}\bar{1}1$.

Dès lors, la condition générale pour qu'une face (qrs) soit comprise dans une zone MNP étant

$$Mq + Nr + Ps = 0,$$

cette condition devient

$$-q - r + s = 0$$

ou

$$s = q + r.$$

Ainsi la plus grande caractéristique en valeur absolue doit être égale à la somme des deux autres ; de cette manière {123} et {134} sont des hexoctaèdres parallèles aux axes ternaires.

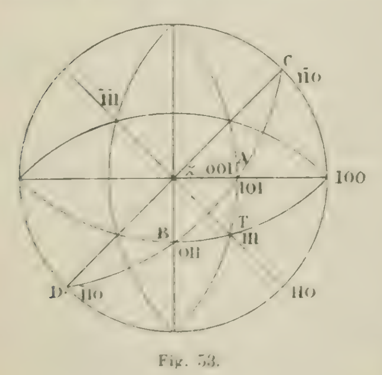


Fig. 53.

Il est facile de trouver, sur la sphère, le lieu des pôles dont les caractéristiques satisfont à cette relation. En effet, ces pôles doivent être sur un grand cercle normal à l'axe ternaire $\bar{1}\bar{1}1$, qui est leur axe de zone. Or nous savons qu'à tout axe ternaire correspondent trois axes binaires qui lui sont normaux. Dans l'espèce, ces troix axes ne peuvent être que ceux aboutissant en A (101), en B (011) et en C ($\bar{1}$10) ou D ($\bar{1}$10) (fig. 53). Si donc, par les points CABD, nous faisons passer un cercle, ce sera la perspective du cercle de zone cherché. Il existe, sur la figure, quatre cercles de ce genre, correspondant aux quatre axes ternaires situés dans l'hémisphère supérieur.

Formes parallèles aux axes binaires. Trapézoèdre. Trioctaèdre. — Toute face parallèle à un axe binaire doit avoir son pôle dans le plan de symétrie normal à cet axe. C'est donc sur les perspectives des plans secondaires que doivent se trouver les pôles des formes cherchées. D'ailleurs, toute face qui touche la sphère sur un plan secondaire, bissecteur du dièdre de deux plans principaux, coupe évidemment à la même distance du centre les deux axes quaternaires non contenus dans le plan secondaire. Deux des caractéristiques de la forme doivent donc être égales.

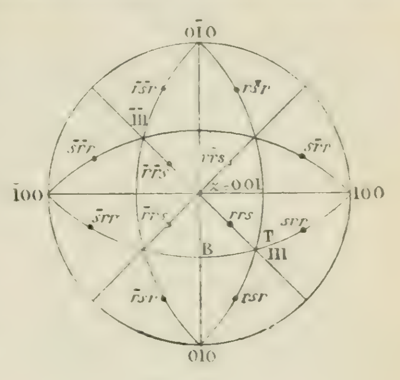


Fig. 54.

Cela posé, deux cas peuvent se présenter : ou bien les caractéristiques égales sont plus petites que l'autre ou elles sont plus grandes.

Dans le premier cas (fig. 54), la face déterminante (*rrs*) du triangle BTz doit avoir son pôle entre l'axe 001 et l'axe ternaire 111. La forme, réduite à 24 faces, puisque l'axe auquel elle est parallèle est d'ordre pair, comprend, dans chaque octant, trois pôles directement semblables, *rrs*, *rsr*, *srr*. On voit de suite qu'il en résulte des pointements quadruples sur les axes quaternaires, triples sur les axes ternaires et quadruples sur les axes binaires. Chaque face, telle que *rrs*, en rencontre quatre autres *rsr*, *srr*, $r\bar{r}s$, $\bar{r}rs$, et a, par conséquent, la figure d'un quadrilatère.

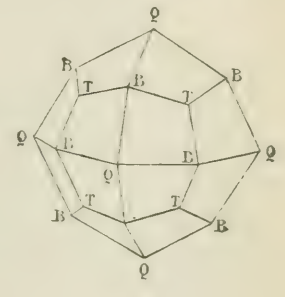


Fig. 55.

La forme résultante est le *trapézoèdre*, *icositétraèdre* ou *leucitoèdre* (fig. 55), ce dernier nom provenant de la leucite, substance minérale qui affecte souvent cette forme avec une grande perfection. Le trapézoèdre le plus fréquent est {112}; le pôle de sa face déterminante est situé à l'intersection du plan 110 avec le cercle de zone des formes parallèles à l'axe ternaire $\bar{1}\bar{1}1$. En effet, la forme {112} obéit à la relation $1 + 1 = 2$. Elle est donc en même temps parallèle aux axes binaires et parallèle aux axes ternaires.

Le trapézoèdre (*rrs*) a deux sortes de dièdres : ceux des arêtes des pointements quaternaires, avec $\cos x = \frac{s^2}{2r^2 + s^2}$ et ceux des arêtes des pointements ternaires, avec $\cos y = \frac{r^2 + 2rs}{2r^2 + s^2}$.

On connaît (112), avec $x = 131°49'$, $y = 146°27'$;
(113), avec $x = 144°54'$, $y = 129°31'$;
(114), avec $x = 152°44'$, $y = 120°$;
(115), avec $x = 157°48'$, $y = 114°3'$;
(116), avec $x = 161°20'$, $y = 110°$, etc.

Dans le second cas, les caractéristiques étant rangées en ordre ascendant, le symbole devient $\{rss\}$. Le pôle de la face déterminante est situé sur BT (fig. 56). Il en résulte des pointements à huit faces sur les axes quaternaires, à trois faces sur les axes ternaires et des biseaux sur les axes binaires. Chaque face

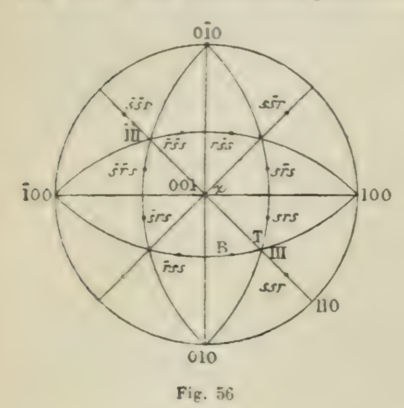


Fig. 56

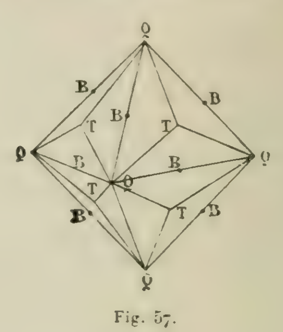


Fig. 57.

rss en rencontre trois autres, *ssr*, *srs*, $\bar{r}ss$ et a la forme d'un triangle isocèle, les deux pôles *ssr* et *srs* étant symétriques de *rss*. De plus, sur les plans principaux, les intersections de deux faces *rss* et $\bar{r}ss$ se font évidemment suivant des lignes parallèles aux axes binaires et qui, aux limites de chaque octant, se combinent en un triangle équilatéral. La forme est donc un octaèdre régulier, dont chaque face est couronnée par une pyramide à trois pans (fig. 57). On lui donne le nom de *trioctaèdre*. Le plus simple et le plus fréquent est $\{122\}$.

En faisant $q = r$ dans le tableau des 48 faces de $\{qrs\}$, on constate que la première colonne fait double emploi avec la quatrième et la seconde avec la troisième. Si donc il y a, comme dans le cas du tétrahexaèdre $\{ors\}$, identité entre la demi-forme directe et la demi-forme inverse, cette identité ne porte plus sur les mêmes éléments.

Dans le trioctaèdre $\{rss\}$, il y a des arêtes longues (binaires), dont le dièdre est déterminé par $\cos x = \frac{2s^2 - r^2}{2s^2 + r^2}$ et des arêtes courtes (ternaires), pour lesquelles $\cos y = \frac{s^2 + 2rs}{2s^2 + r^2}$.

On connaît (133), avec $x = 158°28'$, $y = 142°8'$;
(122), avec $x = 141°3'$, $y = 152°44$;
(233), avec $x = 129°31'$, $y = 162°40$, etc.

II. — *FORMES NORMALES*

Forme normale aux axes quaternaires. Cube. — Les pôles de la forme, au nombre de six, sont les extrémités mêmes des axes quaternaires, et appartiennent à la fois aux plans principaux et aux plans secondaires de symétrie. Les six faces correspondantes, deux à deux parallèles, donnent naissance (fig. 58) à un cube ABCD, qui a ses arêtes parallèles aux axes quaternaires, et ses diagonales parallèles aux axes ternaires, tandis que la direction des axes binaires est exprimée par celle des diagonales des faces. Les faces du cube (fig. 59) sont d'ailleurs parallèles aux plans principaux et les plans diagonaux ont la direction des plans de symétrie secondaires.

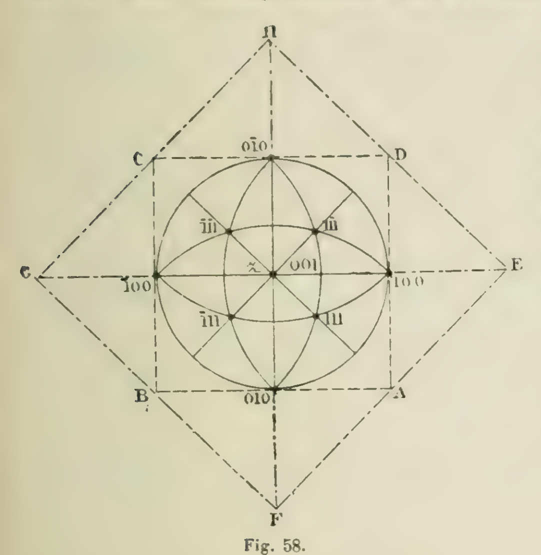


Fig. 58.

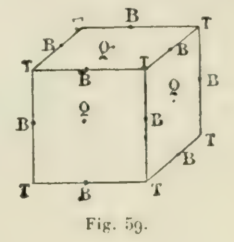


Fig. 59.

Le symbole de la forme est $\{001\}$. Non seulement les quatre colonnes du tableau de $\{qrs\}$ sont identiques; mais des douze faces dont se compose l'une d'elles, six seulement sont distinctes. Ainsi la combinaison de trois axes simplement binaires avec quatre axes ternaires suffit deux fois à donner toutes les faces du cube.

Le symbole $\{001\}$ est un cas particulier de $\{ors\}$, celui où $r = 0$, $s = 1$. Le cube est donc une forme non seulement normale, mais encore parallèle aux axes quaternaires. Cela devait être, chaque axe quaternaire étant normal aux deux autres. En outre $\{001\}$ est un cas particulier de $\{rrs\}$, quand on fait $r = 0$. Le cube est donc aussi parallèle aux axes binaires et, en effet, nous savons que chaque face cubique contient deux de ces axes, qui sont ses diagonales. Le cube est ainsi la limite d'un trapézoèdre, dans lequel r irait sans cesse en diminuant.

Forme normale aux axes ternaires. Octaèdre. — Les huit pôles de la forme sont les extrémités des axes ternaires et les plans tangents correspondants définissent un *octaèdre régulier* (fig. 60) à base carrée EFGH (fig. 58), dont le symbole est $\{111\}$. Les arêtes de cet octaèdre, situées dans les plans

principaux de symétrie, sont parallèles aux axes binaires et les faces forment des triangles équilatéraux, tels que zEF, accouplés quatre par quatre autour des sommets quaternaires, tandis que leurs bases réunies engendrent un carré parfait.

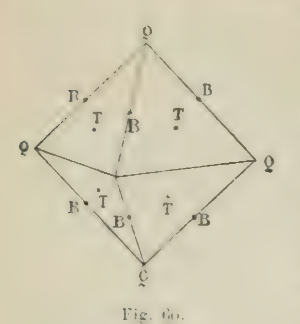


Fig. 60.

Si, dans le tableau général de $\{qrs\}$, on fait $q=r=s=1$, on reconnaît que les trois bandes horizontales, dans lesquelles se divise le tableau, deviennent identiques entre elles et que, dans chacune de ces bandes à quatre pôles, la colonne I est identique avec IV, tandis que III reproduit II. L'octaèdre se compose donc de quatre faces directement semblables et de quatre autres, inversement semblables aux quatre premières.

La notation $\{111\}$ étant un cas particulier de $\{rss\}$, celui où $r=s=1$, l'octaèdre est une forme parallèle aux axes binaires. En effet, il a ses pôles à l'intersection des plans secondaires et nous venons de voir que ses arêtes étaient parallèles aux axes binaires. L'octaèdre est la limite d'un trioctaèdre, où la valeur de r se rapprocherait de plus en plus de celle de s. Aux arêtes de l'octaèdre correspondent des angles dièdres de $109°28'$.

Forme normale aux axes binaires. Rhombododécaèdre. — Les pôles de la forme, au nombre de douze, sont les extrémités des axes binaires. Ils sont situés dans les plans principaux, où chaque groupe de quatre pôles, tels que 110, $\bar{1}10$, $\bar{1}\bar{1}0$, $1\bar{1}0$, s'il était seul (fig. 61), engendrerait un prisme droit, dont la base carrée aurait ses côtés parallèles aux axes binaires. La combinaison des trois prismes carrés fait naître des losanges, se projetant sur les plans principaux suivant des carrés zABC. Dans ces losanges, la courte diagonale AC, qui se projette en vraie grandeur, est parallèle à un axe quaternaire, tandis que la grande diagonale zB, dont la vraie grandeur est DB,

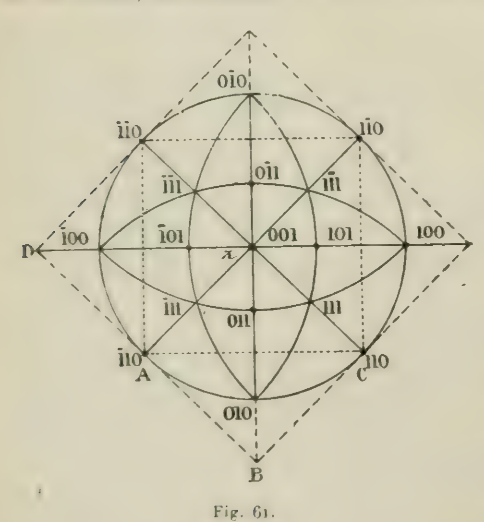


Fig. 61.

est parallèle à un axe binaire. Enfin chaque losange, étant normal à un axe binaire, est parallèle à un plan de symétrie secondaire. Donc les intersections mutuelles de deux losanges contigus (c'est-à-dire les côtés des losanges) sont parallèles aux intersections mutuelles des plans de symétrie non principaux, *c'est-à-dire aux axes ternaires.*

La forme résultante, composée de douze *rhombes* ou losanges égaux, est un *dodécaèdre rhomboïdal* (fig. 62) ou *rhombododécaèdre*, de symbole $\{011\}$. Les douze faces, deux à deux parallèles, représentent les plans non principaux, et les vingt-quatre arêtes, six à six parallèles, représentent les axes ternaires. La grande diagonale des rhombes étant égale à DB (fig. 61), la petite diagonale a pour valeur AC, c'est-à-dire $\frac{DB\sqrt{2}}{2}$.

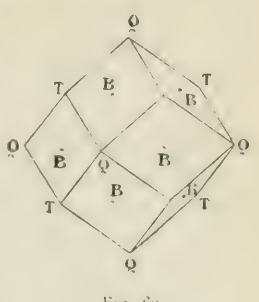


Fig. 62.

En faisant, dans le tableau de $\{qrs\}$, $q=0$ et $r=s=1$, on trouve que les quatres colonnes sont identiques entre elles. Le rhombododécaèdre peut donc se contenter de la moitié de la demi-forme directe.

Le symbole $\{011\}$ correspond à $\{ors\}$, quand $r=s=1$. Ainsi le rhombododécaèdre est parallèle aux axes quaternaires, ce que nous savions déjà, puisque ces axes sont représentés par les courtes diagonales des rhombes. De plus, dans $\{011\}$, on peut dire qu'on a $0+1=1$, c'est-à-dire que les caractéristiques satisfont à la relation établie pour les formes parallèles aux axes ternaires. Nous le savions aussi, les arêtes du rhombododécaèdre étant parallèles à ces derniers. Enfin $\{011\}$ est un cas particulier de $\{rss\}$, celui où $r=0$. La forme est, par suite, parallèle aux axes binaires, ce que nous avons déjà vérifié, en constatant que ces axes étaient représentés par les longues diagonales des faces.

Le rhombododécaèdre jouit donc de ce privilège d'être à la fois normal aux axes binaires et parallèle aux trois catégories d'axes du système terquaternaire.

Tous les angles dièdres auxquels correspondent les arêtes du rhombododécaèdre sont égaux à 120°, puisque ce sont les intersections mutuelles des plans de symétrie ordinaires, lesquels se coupent trois par trois, sous des angles de 120°, sur les axes ternaires.

Rapports des formes restreintes avec l'hexoctaèdre. — Si l'on se reporte à la figure de l'hexoctaèdre (fig. 50), il sera facile d'y découvrir le germe des trois formes normales. En effet, les huit triangles associés autour de chaque pointement Q sont limités au dehors par un contour octogonal BTBTBTBT, qui peut être regardé comme le résultat du brisement des arêtes d'une face carrée, occupant la position d'une face du cube. Le contour extérieur QBQBQB des six triangles coordonnés à un pointement ternaire T est un triangle équilatéral à côtés brisés, qui figure une des faces de l'octaèdre. Enfin le contour QTQT des quatre triangles réunis sur chaque pointement binaire B représente le losange du rhombododécaèdre.

Les formes parallèles s'y apercevraient avec la même facilité : ainsi la face du cube pyramidé QTBTQ, celle du trapézoèdre QBTBQ, enfin celle du triocTaèdre QBQTQ.

§ 4

DÉRIVATION DES FORMES TERQUATERNAIRES A L'AIDE DU CUBE

Troncatures cubiques. Notation de Lévy. — Les formes cristallines du système terquaternaire se rencontrent rarement à l'état de formes simples indépendantes. Elles se combinent en plus ou moins grand nombre les unes avec les autres. Le cas le plus fréquent est celui où elles apparaissent sous la forme de troncatures sur les angles ou les arêtes du cube. Il est aisé de déterminer directement l'aspect que doivent offrir ces troncatures dans les différents cas.

Auparavant, il convient d'indiquer le système de notation établi par Lévy [1] et spécialement applicable à la méthode des troncatures. Le parallélépipède fondamental d'un système donné comporte trois couples de faces, respectivement désignées par p, m, t (c'est-à-dire par les trois consonnes fondamentales du mot *primitif*). Les angles sont désignés par des voyelles et les arêtes par des consonnes. Cela posé, il est aisé de voir que, dans le cube, toutes les faces, identiques entre elles comme parallèles aux plans principaux, doivent porter la notation p (fig. 63). Tous les angles, qui correspondent à des pointements ternaires égaux, sont des angles a. Enfin toutes les arêtes, respectivement parallèles aux axes quaternaires, sont des arêtes b.

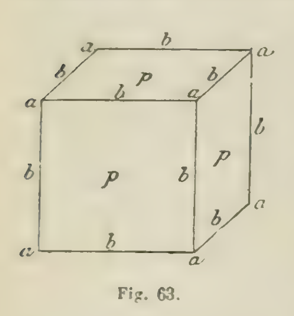


Fig. 63.

Les axes binaires, nous le savons, sont parallèles aux diagonales des faces du cube, tandis que les diagonales du cube lui-même coincident avec les axes ternaires. Enfin rappelons que les plans diagonaux du cube, au nombre de six, dont chacun est bissecteur de l'angle dièdre formé par deux faces, c'est-à-dire par deux plans principaux, représentent les plans de symétrie secondaires.

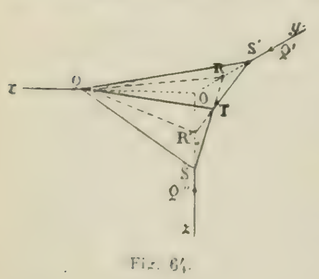
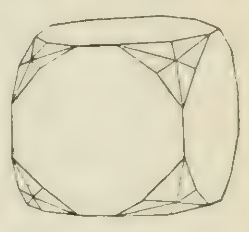


Fig. 64.

Cube et hexoctaèdre. — Examinons d'abord le cas général de la forme oblique. Soient Ox, Oy, Oz (fig. 64), les trois arêtes d'un cube, concourant au même sommet O et parallèles aux trois axes quaternaires. Imaginons une face QRS, interceptant sur Ox une longueur $OQ = \frac{1}{q}$, sur Oy une longueur $OR = \frac{1}{r}$, sur Oz une longueur $OS = \frac{1}{s}$.

(1) C'est à Haüy qu'est due la première idée de cette notation, développée par Lévy et perfectionnée depuis par des Cloizeaux.

Le plan de symétrie qui passe par Ox exige une autre face QR′S′, interceptant, sur Oy, OS′ = OS et, sur Oz, OR′ = OR. Par suite, l'angle O est provisoirement remplacé par deux facettes QST, QS′T, dont l'intersection mutuelle QT vient aboutir sur l'arête Ox. Mais les trois arêtes étant identiques, en vertu de l'axe ternaire sur lequel elles se rencontrent, ce qui a été fait sur Ox doit être répété sur Oy en Q′ et sur Oz en Q″. Donc l'angle O fait place à trois couples de deux faces et ces six faces doivent venir se rencontrer au même point, leurs intersections mutuelles allant concourir, les unes sur les arêtes, les autres sur les sommets des faces du cube (fig. 65). On voit alors sans peine que cette combinaison, développée de manière à faire disparaître les faces cubiques, aboutirait à un hexoctaèdre.


Fig. 65.

La notation de cet hexoctaèdre est facile à établir. On l'obtient en mettant en évidence chacune des arêtes b, et en affectant chaque lettre b d'un exposant égal à la longueur interceptée par la troncature déterminante QRS. De la sorte, l'hexoctaèdre a pour symbole :

$$b^{\frac{1}{q}}\ b^{\frac{1}{r}}\ b^{\frac{1}{s}}.$$

Ainsi le solide $\{ qrs \} = \{ 125 \}$ se traduit dans ce système par

$$b^{1}\ b^{\frac{1}{2}}\ b^{\frac{1}{5}}.$$

Cube pyramidé. — Une troncature parallèle aux axes quaternaires est parallèle aux arêtes du cube. Il convient donc de remplacer (fig. 66) une arête

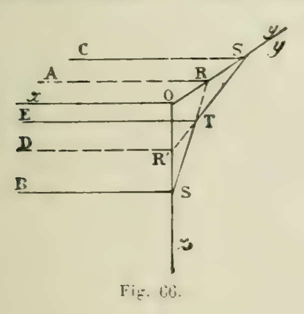
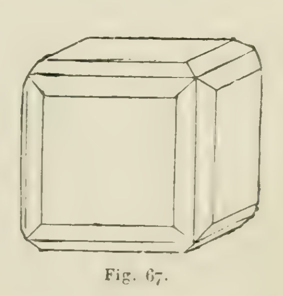


Fig. 66.


Fig. 67.

Ox par une face telle que ARSB, interceptant sur Ox une longueur $\frac{1}{q} = \infty$; sur Oy, $OR = \frac{1}{r}$, et sur Oz, $OS = \frac{1}{s}$. Mais le plan de symétrie qui passe par Ox exige une autre facette CS′R′D, aussi parallèle à Ox, et interceptant $\frac{1}{r}$ sur Oz et $\frac{1}{s}$ sur Oy. Ces deux facettes remplacent Ox par un biseau dont l'arête est TE. Chacune des trois arêtes concourantes est ainsi remplacée par un biseau (fig. 67), de telle sorte que chaque face cubique fait place à une pyramide tron-

quée à base carrée, conduisant, quand la forme est complète, au cube pyramidé.

La notation de cette forme devrait être :

$$b^{\frac{1}{0}}\, b^{\frac{1}{r}}\, b^{\frac{1}{s}}.$$

Pour abréger, on est convenu de l'écrire :

$$b^{\frac{\frac{1}{r}}{\frac{1}{s}}} \text{ ou } b^{\frac{s}{r}}.$$

Ainsi le tétrahexaèdre {012}, le plus simple et aussi le plus fréquent de tous, a pour symbole b^2. L'angle pb^2 est égal à 153°26′.

Cube et trapézoèdre. — Les axes binaires étant parallèles aux diagonales des faces du cube, toute face qui leur est parallèle doit intercepter deux longueurs égales sur deux arêtes concourantes. Supposons d'abord que ces lon-

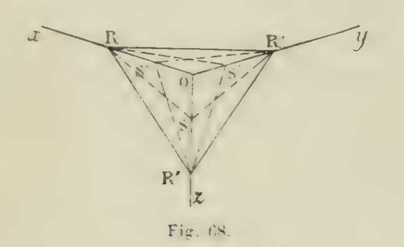
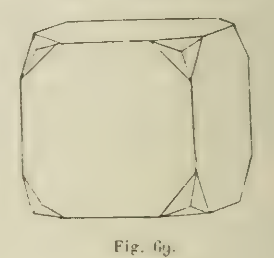


Fig. 68.


Fig. 69.

gueurs égales soient plus grandes que la troisième. Dans ce cas (fig. 68), à la troncature RR′S, interceptant, sur Ox, $OR = \frac{1}{r}$, sur Oy, $OR' = \frac{1}{r}$, et sur Oz, $OS = \frac{1}{s}$, correspondent deux autres faces symétriques RS′R″, R′R″S″, telles que $OR = OR' = OR'' = \frac{1}{r}$. Cet ensemble donne lieu à un pointement triple (fig. 69), dont les arêtes d'intersection aboutissent aux arêtes du cube et qui, prolongé, conduit à un trapézoèdre.

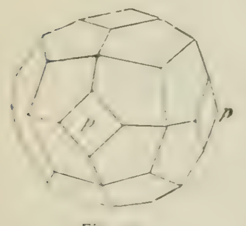


Fig. 70

La notation devrait être

$$b^{\frac{1}{r}}\, b^{\frac{1}{r}}\, b^{\frac{1}{s}}.$$

On convient de l'écrire

$$a^{\frac{\frac{1}{r}}{\frac{1}{s}}} \text{ ou } a^{\frac{s}{r}}$$

étant donné $s > r$.

Ainsi, la lettre a, affectée d'un exposant, entier ou fractionnaire, mais plus grand que l'unité, représente un trapézoèdre. Le plus simple et le plus fréquent de tous est {112} ou a^2, avec $pa^2 = 144°44'$.

La figure 70 représente un trapézoèdre, sur les pointements quaternaires duquel le cube p apparaît à l'état de troncatures.

Cube et trioctaèdre. — Quand les deux longueurs égales sont plus petites que la troisième (fig. 71), la première troncature RSS′, interceptant $OS = \frac{1}{s}$, $OS' = \frac{1}{s}$ et $OR = \frac{1}{r}$, se combine avec deux autres, R′S′S″, R″SS″, telles que $OR' = OR'' = \frac{1}{r}$.

Il en résulte trois facettes (fig. 72), dont les arêtes mutuelles d'intersection, au lieu de se diriger vers les arêtes du cube, se dirigent vers les milieux des



Fig. 71. Fig. 72.

faces. De cette manière, chaque face cubique est remplacée par une pyramide à huit pans, ce qui conduit au trioctaèdre.

La notation

$$b^{\frac{1}{r}}\, b^{\frac{1}{s}}\, b^{\frac{1}{s}},$$

avec $s > r$, se transforme en $a^{\frac{r}{s}}$, et la forme { 122 } devient $a^{\frac{1}{2}}$ ($pa^{\frac{1}{2}} = 131°49'$ adjac.). Ainsi la lettre a, affectée d'un exposant plus petit que l'unité, représente un trioctaèdre.

Cube et octaèdre. — La forme normale aux axes quaternaires est le cube lui-même; elle a donc pour symbole p.

La forme normale aux axes ternaires se réduit, sur chaque angle, à une troncature également inclinée sur les trois arêtes (fig. 73). C'est $a^{\frac{s}{r}}$ avec $s = r$, c'est-

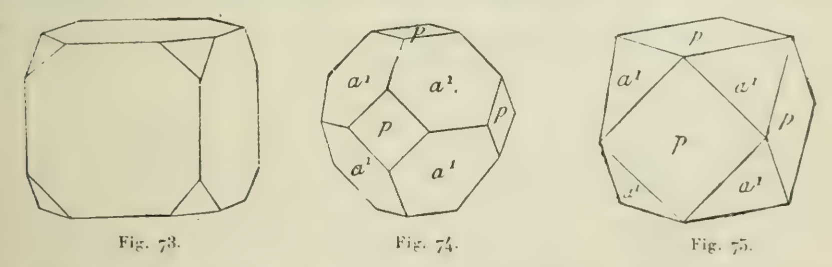


Fig. 73. Fig. 74. Fig. 75.

à-dire a^1. Tel est le symbole de l'octaèdre, symbole qui suffit à faire voir que cette forme est en même temps parallèle aux axes binaires, puisqu'elle rentre dans la formule générale $a^{\frac{s}{r}}$.

La figure 74 représente l'octaèdre dominant, tronqué par le cube ($pa^1 = 125° 15' 52''$), tandis que, dans la figure 75, ou *cubo-octaèdre*, les deux formes simples ont exactement le même développement.

Cube et rhombododécaèdre. — La forme normale aux axes binaires est facile à trouver. L'axe binaire aboutissant en O étant la diagonale OA de la face xOy (fig. 76), on aura une face normale à cet axe en menant QQ′ perpendiculaire à OA (et, par suite, également incliné sur Ox et Oy), et en faisant

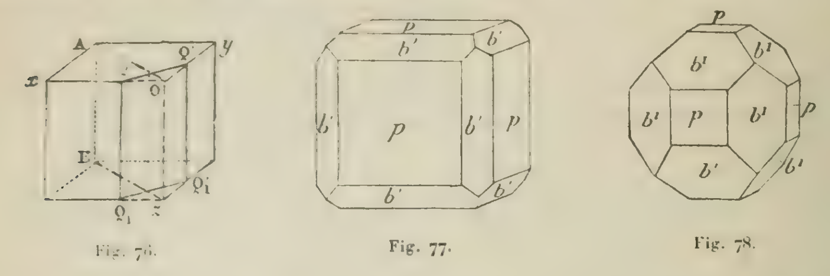


Fig. 76. Fig. 77. Fig. 78.

passer un plan par QQ′ et par une parallèle à Oz, qui est également perpendiculaire sur OA. La face $QQ'Q_1Q'_1$, ainsi déterminée, est parallèle à Oz et rentre dans la formule générale $b^{\frac{s}{r}}$ avec la condition $s = r$, ce qui donne b^1. Tel est le symbole du rhombododécaèdre. D'ailleurs cette troncature n'est qu'un cas particulier de $a^{\frac{s}{r}}$, celui où $s = 0$. Enfin $QQ'Q_1Q'_1$ est parallèle à un plan diagonal du cube, contenant deux axes ternaires. La forme est donc à la fois normale aux axes binaires et parallèle aux trois catégories d'axes. L'angle pb^1 est de 135°.

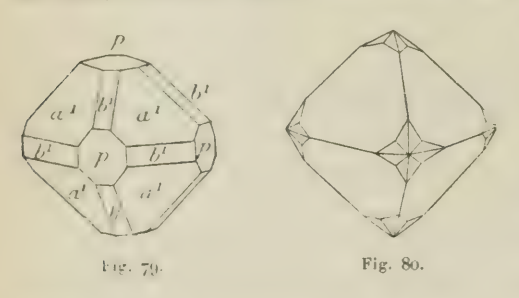


Fig. 79. Fig. 80.

Dans la figure 77, le cube domine relativement au rhombododécaèdre. L'inverse a lieu dans la figure 78.

Combinaisons diverses. — La figure 79 montre la combinaison, souvent réalisée dans la galène, du cube p avec l'octaèdre a^1 et le rhombododécaèdre b^1. L'angle $a^1 b^1$ est de 144°44′.

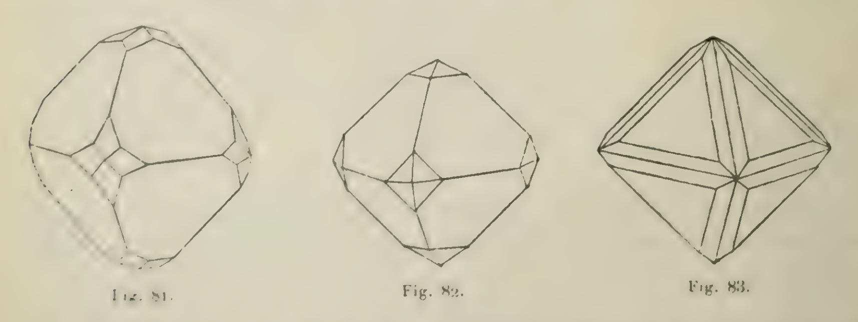


Fig. 81. Fig. 82. Fig. 83.

Les figures 80, 81, 82, 83 et 84 représentent l'octaèdre dominant, avec ses angles tronqués par l'hexoctaèdre (fig. 80), par le tétrahexaèdre (fig. 81), par le

trapézoèdre (fig. 82), par le trioctaèdre (fig. 83), enfin par le rhombododécaèdre (fig. 84), qui est *tangent* aux arêtes de a^1.

Le trapézoèdre est représenté, dans la figure 85, en combinaison avec l'oc-

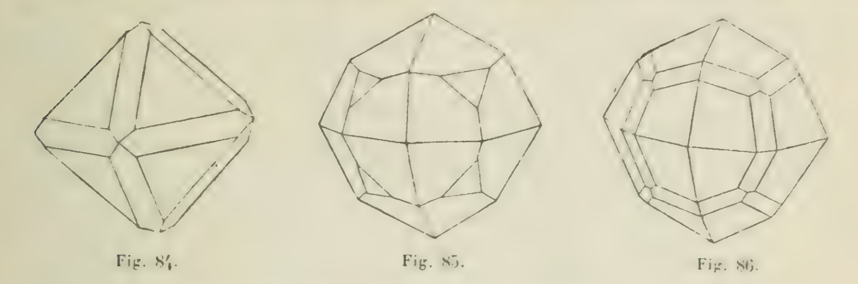


Fig. 84. Fig. 85. Fig. 86.

taèdre, tandis que la figure 86 montre le trapézoèdre a^2 combiné avec le trioctaèdre $a\frac{2}{3}$ ou {233}, dont chaque face a la propriété de former zone avec deux faces adjacentes du trapézoèdre, alors que c'est le trapézoèdre $a\frac{1}{3}$ qui fait zone avec deux faces adjacentes du trioctaèdre $a\frac{1}{2}$.

Combinaisons du rhombododécaèdre. — Plusieurs substances offrent

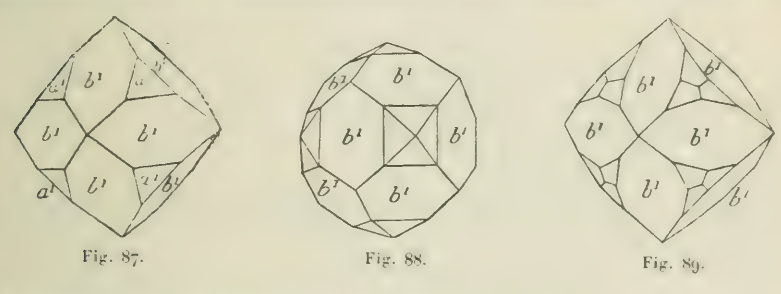


Fig. 87. Fig. 88. Fig. 89.

des combinaisons où domine le rhombododécaèdre. De ce nombre est la *cuprite*, où l'octaèdre se présente souvent à l'état de troncatures sur les angles du dodécaèdre (fig. 87). La figure 88 montre l'association du rhombododé-

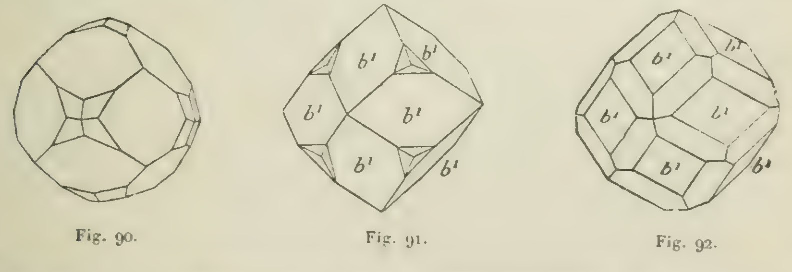


Fig. 90. Fig. 91. Fig. 92.

caèdre avec le cube pyramidé. Ce même rhombododécaèdre est tronqué, dans la figure 89, par un trapézoèdre aigu, et, dans la figure 90, par un trapézoèdre aplati, tandis que, dans la figure 91, c'est un trioctaèdre qui est installé sur les angles ternaires du dodécaèdre.

Le rhombododécaèdre ayant ses arêtes parallèles aux axes ternaires, si l'on remplace chacune d'elles par une face également inclinée sur les deux faces adjacentes, la forme résultante, à 24 faces deux à deux parallèles, sera parallèle aux axes ternaires. D'autre part, puisqu'elle intercepte des longueurs égales sur deux des trois arêtes concourantes du rhombododécaèdre elle est parallèle aux grandes diagonales des losanges, c'est-à-dire aux axes binaires. C'est d'ailleurs un trapézoèdre, puisque les pointements sont quadruples sur les axes quaternaires. Par suite, ce ne peut être que $\{rrs\}$ avec $2r = s$ ou $\{112\}$, c'est-à-dire a^2. Ainsi le trapézoèdre a^2 est tangent aux arêtes du rhombododécaèdre (fig. 92). L'angle a^2b^1 est de 150°.

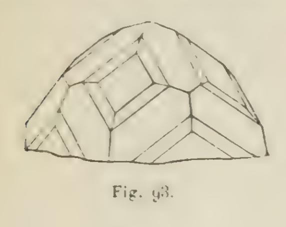


Fig. 93.

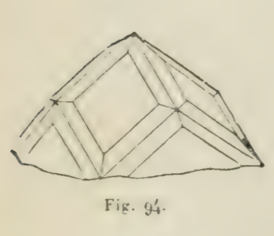


Fig. 94.

Supposons maintenant que, de part et d'autre des faces de a^2, installées sur les arêtes du rhombododécaèdre, on place deux facettes symétriques, parallèles à ces mêmes arêtes. Ces facettes conduiront à un hexoctaèdre parallèle aux axes ternaires. Cette double combinaison est fréquemment réalisée dans le grenat (fig. 93). Quand le trapézoèdre fait défaut, le cristal prend la forme de la figure 94.

Si, dans cette figure, l'hexoctaèdre est $\{123\} = b^1 b^{\frac{1}{2}} b^{\frac{1}{3}}$, l'angle de ses facettes avec les faces b^1 adjacentes sera de 160° 53′ 30″.

Notation des éléments de symétrie. — Il est facile d'indiquer les notations que peuvent recevoir, en fonction des symboles des formes simples, les divers éléments de symétrie du système cubique. Les plans principaux sont représentés par les faces p; les plans non principaux par les faces de b^1. Les axes quaternaires, en outre de leur symbole b, peuvent être représentés par pp, c'est-à-dire par l'intersection de deux faces p. Les axes ternaires sont les lignes d'intersection de deux faces b^1 adjacentes et le symbole b^1b^1 adj. leur convient. Enfin les axes binaires, parallèles à l'intersection des faces du cube avec celles de l'octaèdre, ou encore aux intersections mutuelles des faces octaédriques adjacentes, seraient notés, soit pa^1, soit a^1a^1 adj.

Perspective stéréographique. — La figure 95 représente la perspective stéréographique des principales formes du système cubique. Les cercles passant par deux faces b^1 adjacentes, qui sont les cercles de zone des formes parallèles aux axes ternaires, coupent les plans non principaux en des points qui ne peuvent appartenir qu'à un trapézoèdre $\{rrs\}$. D'ailleurs, ce trapézoèdre, parallèle aux axes ternaires, doit satisfaire à la relation $2r = s$. Ce ne peut être que $\{112\}$ ou a^2. On reconnaîtrait aisément que le cercle de zone de deux faces a^2, adjacentes de part et d'autre d'un plan principal, coupe ce dernier au pôle du tétrahexaèdre b^2, tandis qu'il rencontre les cercles des plans non principaux aux pôles du trioctaèdre $a^{\frac{1}{2}}$. Enfin on s'assurerait que les points

marqués u et v appartiennent à l'hexoctaèdre $b^1\,b^{\frac{1}{2}}\,b^{\frac{1}{3}}$, u correspondant à la face (123) et v à la face (213).

Ainsi, conformément à la féconde formule des zones, on peut, sur cette figure, à l'aide des intersections mutuelles des cercles connus, placer une infinité de formes, aux symboles de plus en plus compliqués.

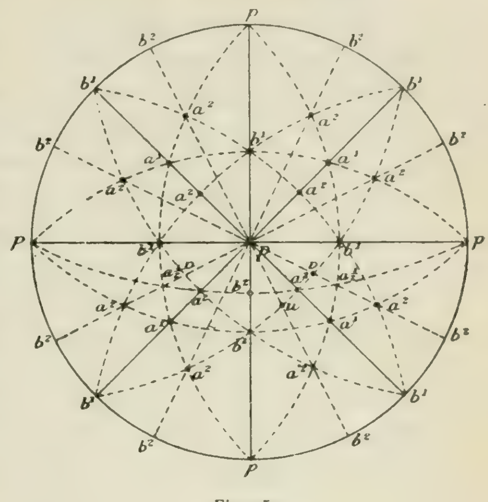


Fig. 95.

Influence du mode cubique sur l'importance relative des formes. — Les diverses formes qui viennent d'être énumérées peuvent se produire, quel que soit le mode particulier auquel obéit la symétrie terquaternaire. Mais si elles sont possibles dans les trois modes, elles n'y possèdent pas pour cela le même degré de *probabilité relative*.

En effet, doubler certains systèmes de rangées, comme on le fait dans le cube centré et le cube à faces centrées, c'est diminuer de moitié la maille de certains plans réticulaires; c'est donc augmenter d'autant la *densité réticulaire* de ces plans, ce qui rend, comme nous l'avons dit, leur production plus probable dans l'acte de la cristallisation.

A ce point de vue, si l'on se reporte à la figure 43 (1), il est facile de voir que la surface de chaque losange du rhomboèdre de 120°, équivalente à la moitié de l'aire du rectangle diagonal de chaque cube, est égale à $\frac{\sqrt{2}}{2}$ et est, par conséquent, inférieure à celle de la maille carrée, qui est égale à l'unité. D'autre part, les faces du rhomboèdre, dirigées suivant les plans diagonaux du cube, sont parallèles aux faces du rhombodécaèdre b^1. Ainsi, dans le mode cubique centré, c'est suivant les faces de b^1 que la densité réticulaire est la plus forte. Aussi Bravais lui a-t-il donné le nom de mode *dodécaédral*.

On voit mieux encore, sur la figure 44 (page 94), que, dans le mode cubique à faces centrées, le privilège de la plus grande densité appartient aux faces du rhomboèdre générateur. Mais chacune de ces faces, telle que ACD, prolongée jusqu'en E et F, devient une troncature également inclinée sur les trois arêtes aboutissant à un angle du cube. Elle est donc parallèle à une face de l'octaèdre a^1. Aussi le mode correspondant a-t-il été appelé *mode octaédral*.

(1) Voir *plus haut*, p. 93.

On comprend bien, de cette manière, pourquoi certaines substances, qui cristallisent dans le système cubique, peuvent présenter des clivages différents. Ainsi la galène et le sel gemme offrent trois clivages également faciles suivant les faces du cube, tandis que la fluorine présente quatre clivages égaux, parallèles aux faces de l'octaèdre, et la blende six clivages suivant les faces du rhombododécaèdre. Cela tient à ce que la première substance appartient au mode cubique ou *hexaédral*, dans lequel les plans de plus grande densité, ceux suivant lesquels tend à se faire la séparation des éléments, sont parallèles aux plans principaux. Au contraire, la fluorine réalise le mode octaédral, et la blende le mode dodécaédral.

Cette différence ne se manifeste pas seulement par le clivage ; elle peut aussi, quoique à un moindre degré, être mise en évidence par la fréquence relative de certaines formes cristallines. Ainsi, en déterminant, par la formule indiquée dans le chapitre 1er de la première section, l'aire des mailles des diverses formes, on peut calculer (1) que l'ordre décroissant des densités réticulaires classe les formes simples de la manière suivante :

1° Mode hexaédral : p, b^1, a^1, b^2, a^2, $a^{\frac{1}{2}}$, b^3, a^3, etc.

2° Mode octaédral : a^1, p, b^1, a^3, $a^{\frac{1}{3}}$, b^2, a^2, a^5, etc.

3° Mode dodécaédral : b^1, p, a^2, b^3, a^1 $(b^1\ b^{\frac{1}{2}}\ b^{\frac{1}{3}})$, a^4, b^2, etc.

On voit par ce tableau que, suivant le mode réalisé, une même forme simple, par exemple a^2, peut avoir le numéro 5, le numéro 7 ou le numéro 3.

§ 5

FORMES MÉRIÉDRIQUES DU SYSTÈME CUBIQUE

Polyèdres holoaxes hémisymétriques. — La recherche des variétés mériédriques, dont le système terquaternaire est susceptible, revient à celle des atténuations qu'on peut faire subir au symbole qui exprime sa symétrie totale.

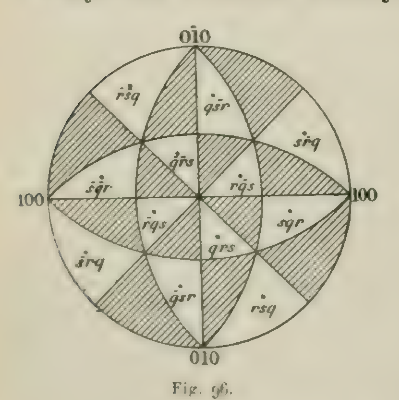


Fig. 96.

En premier lieu, il peut exister des polyèdres particulaires à la fois holoaxes et hémisymétriques, c'est-à-dire possédant les axes $3L^4$, $4L^3$, $6L^2$, mais dépourvus de centre et de plans de symétrie.

Sur la forme oblique générale $\{qrs\}$, de tels polyèdres entraînent la suppression de toute la demi-forme inverse. La demi-forme directe subsiste seule et, suivant qu'on a choisi, pour face déterminante,

(1) Voir Bravais, *Études cristallographiques*, p. 265.

qrs ou son inverse rqs, on obtient deux polyèdres à 24 faces, non superposables, ayant des pointements quadruples sur les axes quaternaires, des pointements triples sur les axes ternaires, et des biseaux sur les axes binaires.

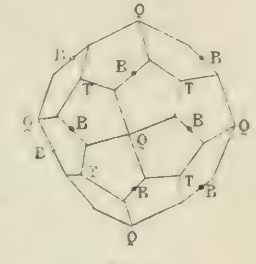
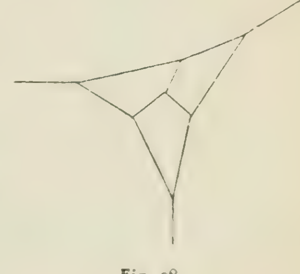


Fig. 97.

Pour reconnaître ceux des pôles qui doivent être conservés, il suffit, sur la perspective stéréographique du système (fig. 96), de supprimer la moitié des triangles élémentaires, de telle sorte qu'il ne subsiste pas deux triangles se touchant suivant un côté; car on sait que les côtés des triangles correspondent aux plans de symétrie, qui ont disparu. On voit sans peine que, par suite de cette suppression, toute face telle que qrs en rencontre cinq autres, savoir : rsq, sqr, $r\bar{q}s$, $\bar{r}qs$, $\bar{q}sr$. Les faces du solide sont donc (fig. 97) des pentagones irréguliers : qrs et rqs donnent ainsi lieu à deux polyèdres différents et non superposables, les faces de l'un étant inversement semblables à celles de l'autre.

Sur l'angle du cube, la modification se traduirait par trois facettes dyssymétriques, dont les arêtes mutuelles d'intersection ne se dirigeraient ni vers les axes quaternaires ni vers les axes binaires (fig. 98). Chaque facette touche une arête cubique par deux côtés inégaux, l'un long et l'autre court. De plus, en considérant deux angles consécutifs du cube, on y verrait les pointements triples *fuir* dans le même sens, ce qui accuserait, entre les deux, l'absence de tout plan de symétrie. Cette disposition tournante justifie le nom de *gyroèdre*, parfois donné à la modification holoaxe de l'hexoctaèdre.


Fig. 98.

Toutes les formes restreintes du système terquaternaire, à l'exception de l'hexoctaèdre $\{ qr(q+r) \}$, parallèle aux axes ternaires, sont orthoparallèles. La demi-forme directe s'y confond avec la demi-forme inverse et, par suite, la forme n'éprouve aucune réduction par le fait de la suppression du centre et des plans de symétrie. L'existence de polyèdres holoaxes hémisymétriques, dans ce système, ne pourrait donc se révéler que sur des hexoctaèdres. Jusqu'à présent, on ne connaît que le salmiac ou sel ammoniac qui réalise cette combinaison, portant, selon M. Tschermak, sur la forme $578 = \{ b^{\frac{1}{5}}\, b^{\frac{1}{7}}\, b^{\frac{1}{8}} \}$.

Polyèdres hémiaxes. — Nous avons dit que les polyèdres moléculaires hémiaxes étaient caractérisés, soit par l'absence de tous les axes binaires, soit par la suppression de la moitié de ces axes, combinée avec la réduction du numéro d'ordre de l'axe pair multiple.

Dans le système terquaternaire, tous les axes binaires, étant de même espèce, doivent être supprimés ensemble. Il n'y a donc qu'une seule variété

admissible de polyèdres hémiaxes. Mais cette suppression entraîne la réduction à moitié du numéro d'ordre des axes quaternaires; car la géométrie enseigne que tout polyèdre, possédant à la fois les trois axes quaternaires et les quatre axes ternaires de l'assemblage cubique, en possède aussi les six axes binaires. On peut d'ailleurs s'assurer directement que le seul moyen de supprimer la moitié des rotations exécutées par la face déterminante est bien de réduire le symbole à $3L^2$, $4L^3$.

Polyèdres hémiaxes centrés : 1° **Diploèdre.** — Cela posé, s'il y a un centre, dont la combinaison avec les trois axes devenus binaires entraîne la restitution des plans principaux de symétrie, le symbole devient $3L^2$, $4L^3$, C, $3P^2$.

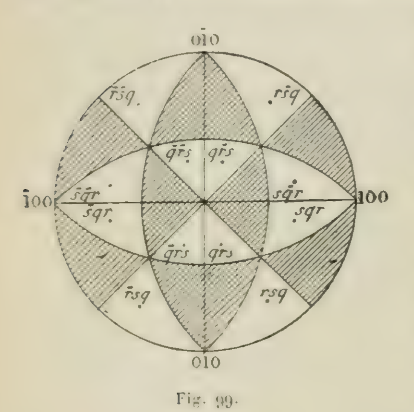


Fig. 99.

Telle est la formule de symétrie des *polyèdres hémiaxes centrés.* Elle implique la suppression, dans le tableau général des faces de { *qrs* }, des colonnes II et IV.

Appliquée à l'hexoctaèdre, cette formule exige, dans chaque octant, la suppression de trois triangles alternants sur six (fig. 99). Mais les plans principaux étant conservés, chaque triangle maintenu, tel que *qrs*, entraîne le maintien du triangle $\bar{q}rs$, contigu au premier dans l'octant voisin, suivant le plan principal. On obtient ainsi une forme à 24 faces (fig. 100), dont 12 directement semblables, avec pointements quadruples sur les axes quaternaires ainsi que sur les axes binaires, et pointements triples sur les axes ternaires. Chaque face *qrs* en rencontre quatre autres, savoir : *rsq*, *sqr*, $q\bar{r}s$, $\bar{q}rs$, et offre la forme d'un quadrilatère irrégulier. Le solide résultant porte les noms de *diploèdre, dyakisdodécaèdre* ou *dodécadièdre,* et la forme dérivée de *qrs* ne diffère que par son orientation de celle qui dérive de *rqs*, l'une pouvant être superposée à l'autre par une rotation de 90° autour des axes redevenus quaternaires.

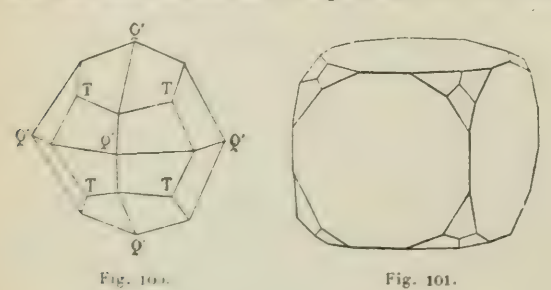


Fig. 100. Fig. 101.

Sur l'angle du cube, le diploèdre se traduit (fig. 101) par un pointement identique avec celui du cas précédent, mais les pointements de deux angles consécutifs sont symétriques l'un de l'autre relativement au plan principal qui passe entre ces deux angles.

Un diploèdre $\frac{1}{2}$ *qrs* a trois sortes de dièdres : les angles *x* des arêtes abou-

tissant en T; les angles y des arêtes longues aboutissant en Q′; les angles z des arêtes courtes Q′ : on a

$$\cos x = \frac{rs + sq + qr}{q^2 + r^2 + s^2}, \qquad \cos y = \frac{r^2 + s^2 - q^2}{q^2 + r^2 + s^2}, \qquad \cos z = \frac{s^2 - r^2 - q^2}{q^2 + r^2 + s^2}.$$

Avec $\frac{1}{2}$ (123), on a $x = 141°47'$, $y = 149°0'$, $z = 115°23'$;

avec $\frac{1}{2}$ (124), on aurait $x = 131°49'$, $y = 154°47$, $z = 128°15'$;

2° **Dodécaèdre pentagonal.** — Dans le cas du tétrahexaèdre $\{ors\}$, la suppression des plans non principaux entraîne celle de la moitié des faces. On obtient ainsi (fig, 102) quatre pôles situés sur le cercle fondamental, quatre autres dans l'hémisphère supérieur et quatre dans l'hémisphère inférieur. Les faces correspondantes se coupent, sur les axes quaternaires, suivant des biseaux parallèles à ces axes. Ainsi rso et $\bar{r}so$ donnent lieu à un biseau parallèle à l'axe 001, tandis que ors et $o\bar{r}s$ en donnent un autre parallèle à l'axe 100. De son côté, sor vient couper la face conjuguée de l'hémisphère inférieur suivant une ligne parallèle à l'axe 010. Sur les axes ternaires, les pointements sont triples et la rencontre, sur les plans principaux, de trois faces telles que rso, $\bar{r}so$, ors, fait naître d'autres pointements triples. Enfin chaque face telle que ors en rencontre cinq autres, savoir : sor, rso, $\bar{r}so$, $\bar{s}or$, $o\bar{r}s$.

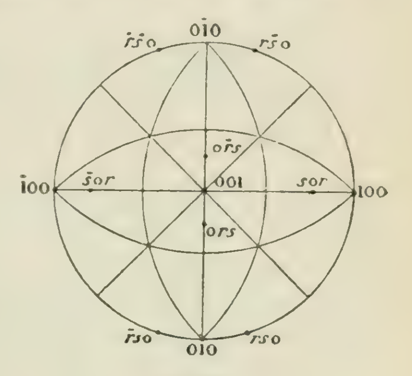


Fig 102.

Le polyèdre, composé de douze pentagones irréguliers, est le *dodécaèdre pentagonal* ou *pentadodécaèdre*. Les faces sont deux à deux symétriques relativement au centre.

Les angles dièdres de cette forme sont de deux sortes : les angles x des arêtes cubiques ou parallèles aux axes quaternaires, donnés par la formule $\cos x = \frac{s^2 - r^2}{r^2 + s^2}$, et les angles y des arêtes aboutissant aux pointements ternaires, avec $\cos y = \frac{rs}{r^2 + s^2}$.

On connaît $\frac{1}{2}\{012\}$, avec $x = 126°52'$, $y = 113°35'$;

$\frac{1}{2}\{023\}$, avec $x = 112°37'$, $y = 117°29'$;

$\frac{1}{2}\{013\}$, avec $x = 143°8'$, $y = 107°27'$.

La figure 103 représente le dodécaèdre pentagonal répondant à $\frac{1}{2}$ {012} ou $\frac{1}{2}$ b^2, où les pointements ternaires sont désignés par T, tandis que Q' désigne les milieux des arêtes, où viennent aboutir les anciens axes quaternaires, devenus binaires. Les pointements triples dépourvus de lettres sont ceux où se réunissent des arêtes non identiques, dont une seule est parallèle à un axe quaternaire. Ce ne sont donc pas de vrais pointements *ternaires*, comme ceux qui sont marqués T. On les distingue à ce qu'ils occupent les deux extrémités de celles des lignes qui sont parallèles aux arêtes cubiques.

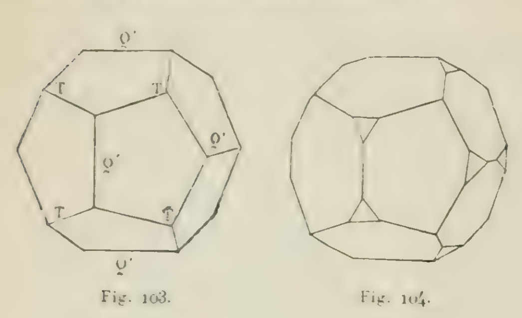


Fig. 103. Fig. 104.

Dans la figure 104, on voit sur ces pointements triples des troncatures triangulaires qui, selon leur forme et leur inclinaison, peuvent appartenir soit à un dodécaèdre pentagonal inverse, soit au dodécaèdre rhomboïdal, lequel coupe évidemment une face sur trois du dodécaèdre pentagonal suivant une parallèle aux axes quaternaires.

3° **Conservation des autres formes restreintes.** — Les formes parallèles aux axes binaires, et de notation {*rrs*} ou {*rss*}, ne peuvent être affectées par la suppression des plans de symétrie; car leurs faces, étant perpendiculaires à ces plans, ne se répétaient pas relativement à chacun d'eux. Le trapézoèdre et le trioctaèdre peuvent donc exister avec des polyèdres hémiaxes centrés. Il en est de même, *a fortiori*, du rhombododécaèdre et de l'octaèdre, dont les pôles sont également situés dans les plans non principaux, et du cube, qui n'emprunte qu'une partie de la colonne I, conservée dans toute hypothèse.

Ainsi les palyèdres particulaires hémiaxes centrés ne font sentir leur défaut de symétrie que sur les hexoctaèdres et les tétrahexaèdres. Tel est le cas de la pyrite de fer, dont les formes très variées peuvent offrir à la fois le cube, l'octaèdre, le pentadodécaèdre (souvent nommé *pyritoèdre* pour ce motif), le trapézoèdre et le diploèdre.

Combinaisons. — En combinaison avec le cube, le dodécaèdre pentagonal se traduit (fig. 105) par des troncatures parallèles aux arêtes, mais inégalement inclinées sur les deux faces cubiques adjacentes.

Avec l'octaèdre dominant, il donne la figure 106.

Quand c'est le dodécaèdre qui domine relativement à l'octaèdre, comme c'est généralement le cas dans la pyrite, on a la figure 107. Mais si, comme dans la cobaltine, les deux formes prennent le même développement, il en résulte un solide à 20 faces (fig. 108), presque identique avec l'*icosaèdre* régulier.

Si, après avoir installé une troncature octaédrique sur les angles ternaires du

dodécaèdre pentagonal, on superpose trois facettes tangentes sur les arêtes de cette troncature (fig. 109), la forme obtenue sera un diploèdre, dont chaque face fait partie de la zone contenant une face octaédrique et une face dodécaédrique

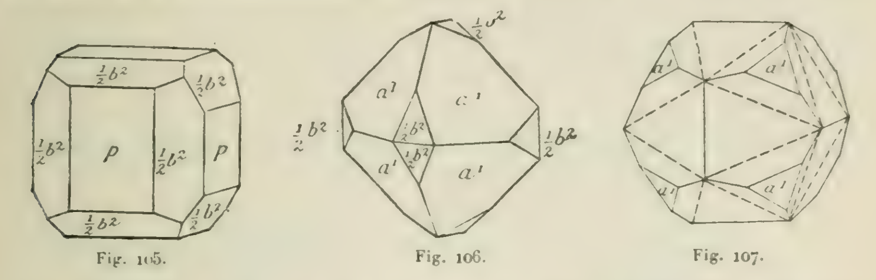


Fig. 105. Fig. 106. Fig. 107.

contiguës. Soient (012) et (111) deux de ces faces. La zone qu'elles déterminent a pour caractéristiques [$\bar{1}$21]. Les diploèdres de cette zone doivent donc satisfaire à la relation :

$$-q+2r-s=0.$$

La forme {123} réalise cette condition. Les pôles analogues se trouvent sur le grand cercle qui passe par 111 et par $\bar{1}$01.

On peut remarquer que le dodécaèdre pentagonal déduit de {*ors*} est la limite vers laquelle tend le diploèdre issu de {*qrs*}, lorsque q tend vers zéro. De la sorte, à un dodécaèdre pentagonal déterminé correspondent une série de diploèdres conjugués. Soit, par exemple, le dodécaèdre issu de {012}. Les

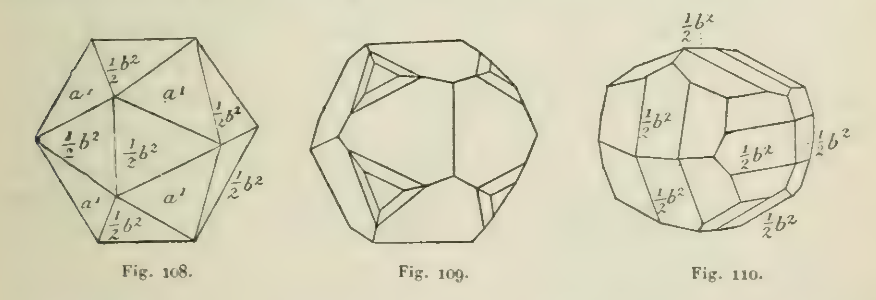


Fig. 108. Fig. 109. Fig. 110.

diploèdres qui lui sont conjugués sont ceux pour lesquels la face (012) fait partie de la même zone que les deux faces contiguës (qrs), ($\bar{q}rs$); car, dans ce cas, à mesure que l'angle de ces deux faces tend vers 180°, elles en arrivent à se confondre avec (012). Or la zone déterminée par (qrs) et ($\bar{q}rs$) a pour caractéristiques, si nous appliquons la règle habituelle :

$$0 \quad \overline{2sq} \quad 2rq,$$

ou, en divisant par $2q$, $$0\bar{s}r.$$

La condition pour que (012) fasse partie de cette zone est :

$$-s+2r=0.$$

Le diploèdre issu de {124} satisfait à cette condition. Sa combinaison avec le dodécaèdre pentagonal $\frac{1}{2}\, b^2 = \frac{1}{2}$ {012} est dessinée dans la figure 110.

Tous les diploèdres faisant partie de la même série ont leurs pôles sur le grand cercle qui passe par (012) et par les extrémités de l'axe (100, $\bar{1}$00). Ce même grand cercle contient le pôle (112) du trapézoèdre a^2 et le pôle (212) du trioctaèdre $a\frac{1}{2}$.

Polyèdres hémiaxes dichosymétriques. 1° Hexatétraèdre. — Avec un polyèdre *hémiaxe dichosymétrique*, dont le symbole est $3L^2, 4L^3, 6P$, ce sont les plans non principaux qui sont conservés, tandis que les plans principaux disparaissent.

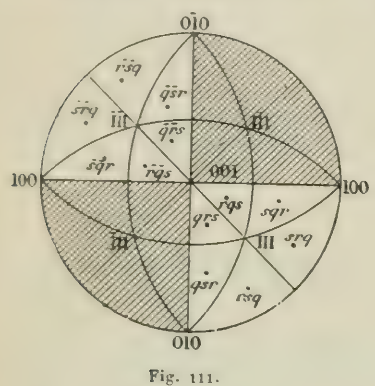


Fig. 111.

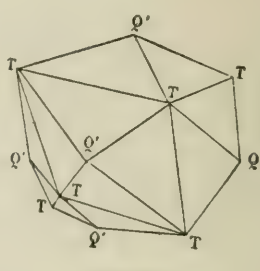


Fig. 112.

Par conséquent, dans la forme générale oblique {qrs}, si l'on prend (qrs) pour face déterminante, il faut conserver les six pôles du premier octant (celui dont l'axe ternaire est 111) et les 6 pôles de l'octant opposé, groupés autour de $\bar{1}\bar{1}$1 (fig. 111). Quant à l'hémisphère inférieur, on garde l'octant situé au dessous de 1$\bar{1}$1 et celui correspondant à $\bar{1}$11. La forme résultante est une sorte de tétraèdre régulier, dont chaque face serait remplacée par une pyramide sextuple (fig. 112). C'est *l'hexatétraèdre*. Les octants supprimés don-

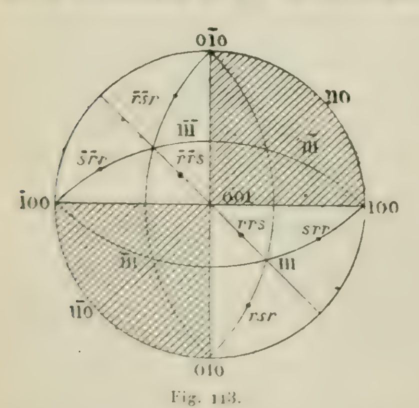


Fig. 113.

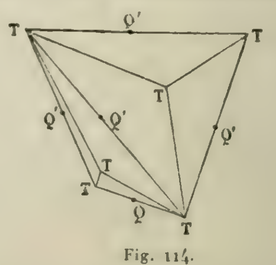


Fig. 114.

nent un autre polyèdre, qui ne diffère du premier que par son orientation. En combinaison avec le cube, l'hexatétraèdre donne des troncatures à six faces sur quatre des angles du cube, non opposés par le centre.

Le tétrahexaèdre {ors}, ayant ses pôles dans les plans principaux, n'éprouve aucune réduction par la suppression de ces derniers.

2° **Tritétraèdre. Dodécaèdre trapézoïdal.** — Le trapézoèdre {rrs} donnera, dans chacun des quatre octants conservés, trois faces symétriquement placées (fig. 113). Les deux faces (rrs), ($\bar{r}\bar{r}s$), les plus voisines du sommet 001, se couperont suivant une ligne parallèle à l'axe binaire 1$\bar{1}$0, rencontrée en son milieu, par l'un des anciens axes quaternaires devenus binaires.

La figure résultante sera un tétraèdre tripyramidé ou *tritétraèdre* (fig. 114). Cette forme est réalisée dans la blende, le cuivre gris et la boracite.

Quant au trioctaèdre { rss }, on voit

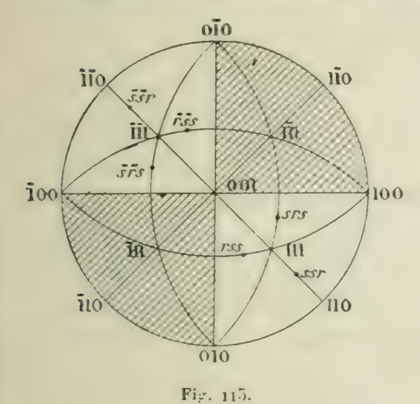


Fig. 115.

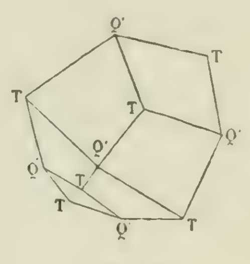


Fig. 116

sans peine (fig. 115) que les faces conservées forment des pointements quadruples sur les axes quaternaires. Chaque face en rencontre quatre autres et il en résulte un *dodécaèdre trapézoïdal* (fig. 116), connu en combinaison dans le cuivre gris.

3° **Tétraèdre** — Le cube et le rhombodocaèdre, dont les pôles sont situés dans les plans principaux, ne sont pas touchés dans cette combinaison. En revanche l'octaèdre, réduit aux pôles 111, $\bar{1}\bar{1}$1, 1$\bar{1}\bar{1}$, $\bar{1}$1$\bar{1}$, perd la moitié de ses faces et se transforme (fig. 117) en ***tétraèdre régulier*** (cuivre gris, boracite, blende, diamant).

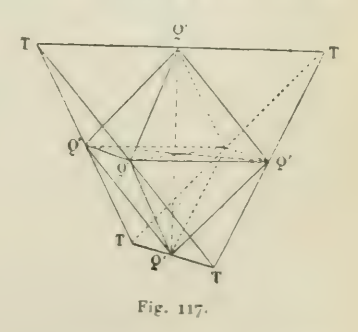


Fig. 117.

L'intersection de la face 111 du tétraèdre avec la face $\bar{1}\bar{1}$1 a lieu suivant une ligne parallèle à l'axe binaire 1$\bar{1}$0-$\bar{1}$10. Ainsi, tandis que les quatre faces du tétraèdre sont parallèles aux axes ternaires, ses six arêtes sont parallèles aux axes binaires. De plus, l'arête supérieure, parallèle à 1$\bar{1}$0, se projette sur le plan principal perpendiculairement à l'arête opposée, dont la projection est l'axe 110, et la ligne QQ', qui joint les milieux de ces deux arêtes, est l'axe quaternaire 001. L'angle dièdre de deux faces du tétraèdre est de 70°32'.

La combinaison du cube avec le tétraèdre donne la figure 118. Quand les deux solides conjugués, le tétraèdre droit et le tétraèdre gauche, coexistent, l'un d'eux est généralement moins développé ou moins éclatant que l'autre,

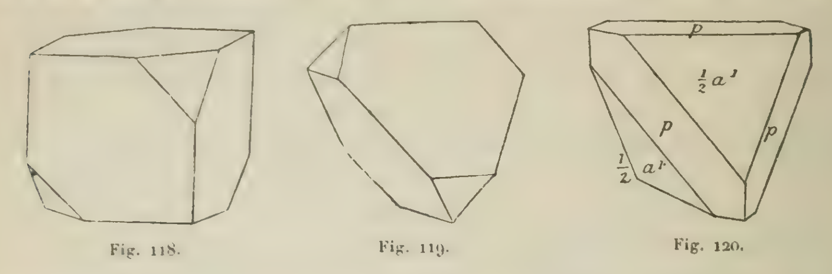


Fig. 118. Fig. 119. Fig. 120.

apparaissant à l'état de troncatures symétriques sur les angles de ce dernier (fig. 119).

D'après ce qui vient d'être dit sur la signification des éléments d'un tétraèdre, si, à chaque arête, on substitue une face *tangente*, c'est-à-dire également inclinée sur les deux faces tétraédriques adjacentes (fig. 120), une telle face sera à la fois parallèle à deux arêtes du tétraèdre et normale aux anciens axes quaternaires, devenus binaires, de l'assemblage. Ce sera donc une face du cube ($pa^1 = 125°15'52''$).

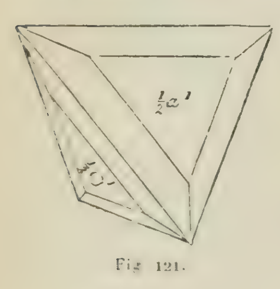
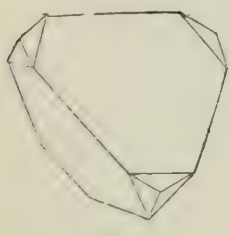
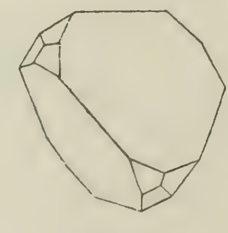
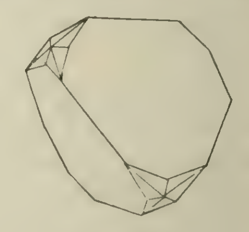


Fig. 121.

Combinaisons diverses. — La figure 121 représente la combinaison du tétraèdre avec un tritétraèdre, tel que $\frac{1}{2}a^2$, tandis que la figure 122 correspond à la combinaison d'un tétraèdre avec le rhombododécaèdre. En effet, chacune des faces qui composent les pointements triples des angles est parallèle à une arête du tétraèdre, c'est-à-dire à un ancien axe binaire. Il suffit







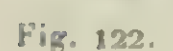


Fig. 122. Fig. 123. Fig. 124.

que, de plus, elle soit parallèle à l'un des trois axes quaternaires, pour qu'elle représente b^1. Ce cas est supposé réalisé dans la figure 122. Autrement, et sans que l'aspect général fût changé, les quatre pointements triples conduiraient à un hémitrioctaèdre ; car ce dernier, comme on peut le remarquer sur la figure 116, devient un rhombododécaèdre quand ses quadrilatères se trans-

forment en losanges, c'est-à-dire quand ses pôles, s'éloignant de plus en plus du sommet 111, viennent se placer dans les plans principaux.

Dans la figure 123, on voit un tétraèdre en combinaison avec un tritétraèdre inverse (ou hémitrapézoèdre), tandis que la figure 124 représente un hexatétraèdre installé sur les angles du tétraèdre de signe contraire.

Polyèdres hémiaxes hémisymétriques. — Avec un polyèdre *hémiaxe hémisymétrique*, il y a suppression simultanée du centre et de tous les plans de symétrie. On ne doit donc garder, dans le premier octant (fig. 125), avec la face *qrs*), que celles qui lui sont directement semblables, c'est-à-dire *rsq*, *sqr*; de plus, tandis que l'octant $\bar{1}\bar{1}1$, qui

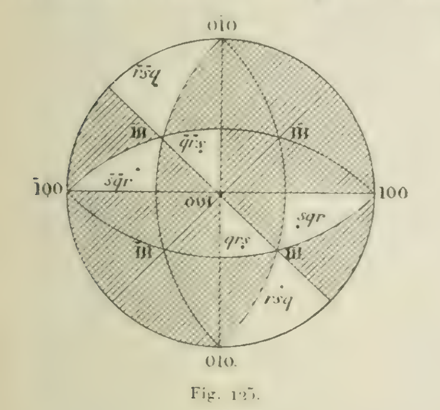


Fig. 125.

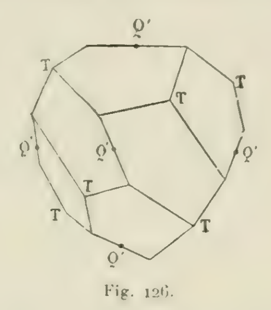


Fig. 126.

dérive du premier par une rotation de 180° autour de 001, est conservé dans les mêmes conditions, c'est-à-dire avec $\bar{q}\bar{r}s$, $\bar{r}\bar{s}q$, $\bar{s}\bar{q}r$, il faut, dans l'hémisphère inférieur, garder les demi-octants opposés à ceux qui ont été supprimés en haut; car chacun d'eux dérive du premier par rotation de 180° autour de 100 et 010.

La forme qui en résulte comprend douze faces, dont chacune en rencontre cinq et forme un pentagone irrégulier. C'est le *dodécaèdre pentagonal tétraédrique* (fig. 126). Suivant qu'on garde comme face déterminante *qrs* ou *rsq*, on obtient deux dodécaèdres non superposables, mais dont le premier se superposerait, par une rotation de 90°, au dodécaèdre déduit de $\bar{r}\bar{q}s$, tandis que le second se superposerait au solide dérivé de $\bar{q}\bar{r}s$. Sur l'un de ces solides, la place des axes quaternaires, devenus binaires, se détermine aisément, chacun d'eux venant tomber sur le milieu Q' d'une arête qui n'aboutit à aucun pointement ternaire.

Le tétrahexaèdre {0*rs*}, dont les pôles sont situés dans les plans principaux, n'éprouve de réduction que par suite du défaut des plans non principaux et se transforme, comme dans le cas des polyèdres hémiaxes centrés, en *dodécaèdre pentagonal*.

Le trapézoèdre, dont les pôles sont situés dans les plans secondaires, garde trois faces dans les octants conservés; mais la suppression du centre et des plans principaux ne laissant subsister que quatre octants, disposés comme dans

Tableau complet des formes du système terquaternaire ou cubique.

SYMBOLES DES FORMES HOLOÉDRIQUES		NATURE DU POLYÈDRE PARTICULAIRE				
		HOLOAXE centré	HOLOAXE hémisymétrique	HÉMIAXE centré	HÉMIAXE dichosymétrique	HÉMIAXE hémisymétrique
FORME OBLIQUE	$\{qrs\}$ $q < r < s$ $b^{\frac{1}{q}}\, b^{\frac{1}{r}}\, b^{\frac{1}{s}}$	Hexoctaèdre	Hémihexoctaèdre pentagonal	Diploèdre (Dodécadièdre)	Hexatétraèdre	Dodécaèdre pentagonal tétraédrique
FORMES PARALLÈLES	$\{ors\} = b^{\frac{s}{r}}$	Tètrahexaèdre	Tétrahexaèdre	Dodécaèdre pentagonal	Tétrahexaèdre	Dodécaèdre pentagonal
	$\{rrs\} = a^{\frac{s}{r}}$	Trapézoèdre	Trapézoèdre	Trapézoèdre	Tritétraèdre	Tritétraèdre
	$\{rss\} = a^{\frac{r}{s}}$	Trioctaèdre	Trioctaèdre	Trioctaèdre	Dodécaèdre trapézoïdal	Dodécaèdre trapézoïdal
FORMES NORMALES	$\{001\} = p$	Cube	Cube	Cube	Cube	Cube
	$\{111\} = a^1$	Octaèdre	Octaèdre	Octaèdre	Tétraèdre	Tétraèdre
	$\{011\} = b^1$	Rhombododécaèdre	Rhombododécaèdre	Rhombododécaèdre	Rhombododécaèdre	Rhombododécaèdre

le cas précédent, on retombe sur le tritétraèdre. Pour la même raison, le trioctaèdre se transforme en dodécaèdre trapézoïdal.

Enfin l'octaèdre est réduit en tétraèdre, tandis que le cube et le rhombododécaèdre ne sont pas affectés.

Ainsi les polyèdres hémiaxes hémisymétriques peuvent offrir la combinaison du tétraèdre, forme à faces inclinées ou antihémiédrique, avec le dodécaèdre pentagonal, forme à faces parallèles ou parahémiédrique. Cette combinaison, en apparence contradictoire et que la théorie seule avait indiquée à Bravais, s'est trouvée depuis réalisée dans le chlorate de soude qui, de plus, dévie le plan de polarisation de la lumière.

CHAPITRE II

SYSTÈME SÉNAIRE OU HEXAGONAL

§ I

FORMES SIMPLES DU SYSTÈME

Noyau du système. — Le symbole complet de la symétrie sénaire est :

$$A^6,\ 3L^2,\ 3L'^2,\ C,\ II,\ 3P,\ 3P'.$$

Le véritable noyau du système est un prisme droit, dont la base est un losange de soixante degrés. Mais si l'on accouple ensemble trois de ces parallélépipèdes, on obtient un *prisme hexagonal régulier*, qui peut être regardé comme la forme fondamentale du système.

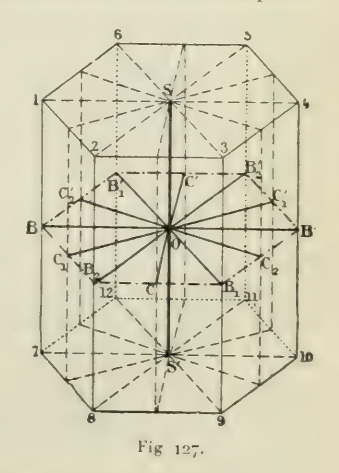


Fig 127.

De même que pour le cube, nous considérerons à part ce noyau prismatique, pour y définir la position des divers éléments de symétrie (fig. 127).

L'*axe sénaire* est la ligne SS′, qui joint les centres des deux bases et est parallèle aux *arêtes verticales du prisme*; son paramètre est OS. Une rotation de 60° autour de cette ligne substitue 1 à 2, 2 à 3, 3 à 4, etc.

Si l'on considère la section droite menée par le centre O, il y a *trois axes binaires de première espèce*, BB′, $B_1B'_1$, B_2 B'_2, parallèles aux côtés de cette section droite, c'est-à-dire aux *côtés de la base* hexagonale, et *trois axes binaires de seconde espèce*, CC′, $C_1C'_1$, $C_2C'_2$, parallèles aux *apothèmes de la base*, ou, ce qui

revient au même, aux lignes joignant les sommets de deux en deux, telles que, par exemple, la ligne qui irait de B_2 en B'_1. On s'assure sans peine, d'un côté, qu'une rotation de 180 degrés autour de l'un quelconque des six axes ne fait qu'opérer la substitution des sommets, d'autre part, que la disposition de ces sommets, relativement aux axes B, n'est pas la même que par rapport aux axes C, qui sont ainsi d'*espèce distincte*. Le paramètre des axes B est OB; celui des axes C est le double de OC.

Le plan de la section droite, qui contient les six axes binaires et est normal à l'axe SS', est un *plan principal* de symétrie. En outre il y a *trois plans de symétrie, parallèles aux faces prismatiques* et passant à la fois par chacun des axes binaires de première espèce et par l'axe sénaire; tandis que *trois autres plans*, passant par les axes de seconde espèce, sont respectivement perpendiculaires aux faces prismatiques. Les six plans, deux à deux d'espèces distinctes, c'est-à-dire correspondant à deux modes de disposition réciproque des sommets, se coupent tous suivant l'axe sénaire SS'. Les plans P, perpendiculaires aux axes L, sont ceux qui passent par les axes L' et réciproquement. Π désigne le plan principal, normal à l'axe sénaire Λ^6.

Choix des axes. — Pour représenter le système, nous ferons choix, comme plan du tableau, du plan normal à l'axe sénaire et ce dernier servira d'axe des z. Il est naturel de choisir, pour axes des x et des y, deux axes binaires de même espèce, qui sont des rangées de même paramètre.

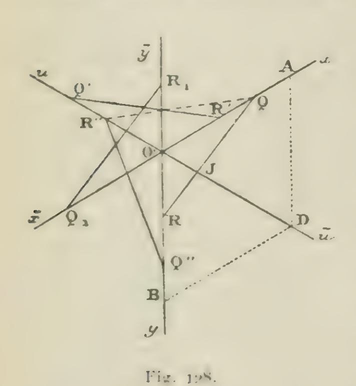


Fig. 128.

Dans ces conditions, la face déterminante de la forme oblique sera un plan, coupant le plan principal suivant la ligne QR (fig. 128) et rencontrant l'axe sénaire à une certaine distance au-dessus de l'origine commune des axes. Si a est le paramètre commun des deux axes Ox et Oy, on aura $OQ = \frac{1}{q} . a$, $OR = \frac{1}{r} . a$.

Quant à l'intersection avec l'axe vertical, elle sera à la distance $\frac{1}{s} . c$, c étant le paramètre de cet axe. La face déterminante sera donc encore définie par trois caractéristiques (q, r, s). Mais, quand nous ferons tourner cette face de 60 degrés autour de l'axe sénaire, les axes des coordonnées feront autre chose que de se substituer les uns aux autres. On ne pourra donc plus se borner, comme dans le système terquaternaire, à permuter simplement les caractéristiques entre elles.

Notation à quatre caractéristiques. — Afin d'obvier à cette difficulté, nous aurons recours à la notation à quatre caractéristiques, imaginée par Bravais et fondée sur l'emploi du troisième axe de même espèce, à titre d'axe

auxiliaire. Ainsi nous aurons trois axes Ox, Oy, Ou, le dernier étant, dans sa partie négative, bissecteur de l'angle des deux premiers. Quant à son paramètre OD, égal aux paramètres OA et OB des axes Ox et Oy, on peut aussi, en construisant le rhombe de 60 degrés OADB, le considérer comme la diagonale du parallélogramme construit sur OAB.

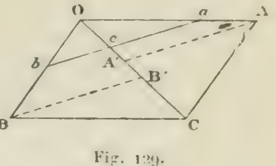


Fig. 129.

Dans ces conditions, il est aisé de déterminer la relation qui unit la caractéristique relative à Ou, c'est-à-dire le coefficient de OJ, avec celles des axes Ox et Oy. En effet, soit OACB (fig. 129) un parallélogramme, et supposons qu'une sécante ab intercepte :

sur OA, $Oa = \frac{1}{q} \times OA$; sur OB, $Ob = \frac{1}{r} \times OB$, et, sur OC, $Oc = \frac{1}{j} \times OC$.

Menons AA' et BB' parallèles à AB. On a $OC = OB' + B'C$. Mais, en vertu de l'égalité des triangles OAA', BCB', on a $B'C = OA'$. Donc $OC = OA' + OB'$.

Divisons les deux membres de l'équation par Oc

$$\frac{OC}{Oc} = j = \frac{OA'}{Oc} + \frac{OB'}{Oc}.$$

Mais, dans les triangles semblables Oca, OA'A, on a $\frac{OA'}{Oc} = \frac{OA}{Oa} = q$.

De même, les triangles Obc, OBB' donnent $\frac{OB'}{Oc} = \frac{OB}{Ob} = r$.

Donc $$j = q + r,$$

c'est-à-dire que la caractéristique auxiliaire est égale à la somme des deux autres. Cette caractéristique est d'ailleurs comptée sur la partie négative de l'axe correspondant. Par suite, la notation d'une face définie par l'intersection QR et coupant l'axe des z à une distance de l'origine égale à $\frac{1}{s} \times c$, c étant le paramètre de cet axe, sera

$$(qr\overline{q+r}s).$$

Remarquons seulement que ces quatre caractéristiques ne sont plus, comme dans le système terquaternaire, exactement proportionnelles aux inverses des véritables longueurs interceptées sur les axes. Cela est vrai pour q, r et $(q+r)$, parce que les trois axes binaires ont le même paramètre. Mais il n'y a pas de commune mesure entre la longueur définie par le coefficient s et les trois autres.

Forme oblique. — Le nombre total des faces de la forme oblique, définie par le symbole $(qr\overline{q+r}s)$, est :

$$2 \times (1 + 5 + 6) = 24.$$

Cherchons maintenant comment seront disposées les 24 faces.

L'axe sénaire pouvant, dans les particules cristallines, avoir son numéro d'ordre abaissé de moitié, considérons-le d'abord comme ternaire et faisons tourner la face déterminante de 120° autour de cet axe. L'intersection de cette face avec l'axe des z (fig. 128) ne changera pas. Quant aux autres caractéristiques, comme Ox permute avec Ou, Ou avec Oy et Oy avec Ox, c'est une *permutation tournante* qui s'accomplit entre les trois premières caractéristiques. Ainsi QR ou $(qr\overline{q+r}s)$ donne naissance à Q'R' ou $(r\overline{q+r}qs)$ et à Q''R'' ou $(\overline{q+r}qrs)$.

Restituons maintenant à l'axe sénaire la totalité de son numéro d'ordre. Après trois rotations de 60°, QR doit venir en Q_1R_1 ; c'est-à-dire que les trois intersections horizontales changent simplement de signe, l'intersection avec l'axe vertical demeurant la même. On a donc

$$(\bar{q}\bar{r}q+rs) \qquad (\bar{r}q+r\bar{q}s) \qquad (q+\bar{r}\bar{q}rs).$$

L'ensemble de ces trois faces et des trois précédentes forme une pyramide ayant pour base un hexagone régulier et pour sommet le point situé sur Oz à la distance $\frac{1}{s} \times c$.

Exprimons ensuite la symétrie relative aux axes binaires de première espèce. Si QR tourne de 180° autour de Ox, il viendra en QR'', c'est-à-dire que, q ne changeant pas, la seconde et la troisième caractéristiques permutent ensemble. Pendant ce temps, s change de signe, car l'intersection avec Oz se fait maintenant, à la même distance, au-dessous du plan du tableau. Cela donne d'abord :

$$(q\overline{q+r}r\bar{s}), \qquad (rq\overline{q+r}\bar{s}) \quad \text{et} \quad (\overline{q+r}rq\bar{s}),$$

puis, en opérant sur les trois autres faces :

$$(\bar{q}q+r\bar{r}\bar{s}), \quad (\bar{r}\bar{q}q+r\bar{s}) \quad \text{et} \quad (q+r\bar{r}\bar{q}\bar{s}).$$

Ces six dernières faces donnent une autre pyramide hexagonale, ayant son sommet sur le plan du tableau, et les deux pyramides se coupent mutuellement suivant un polygone gauche.

Telle est la demi-forme directe. Pour avoir la demi-forme inverse, il suffit de changer les signes. La première série nous donne, en vertu du centre C,

$$(\bar{q}\bar{r}q+r\bar{s}), \quad (\bar{r}q+r\bar{q}\bar{s}) \quad \text{et} \quad (q+r\bar{q}\bar{r}\bar{s}).$$

Si nous appliquons la même règle à la deuxième série, c'est-à-dire si, après avoir fait tourner les faces de la première de 180° autour de Oz, nous les répétons relativement au centre, cela reviendra, en vertu d'un théorème connu, à exprimer directement, à l'aide de la première série, l'existence du plan principal Π ; on aura

$$(qr\overline{q+r}\bar{s}) \quad (r\overline{q+r}q\bar{s}) \quad (\overline{q+r}qr\bar{s}).$$

Enfin, en changeant les signes des troisième et quatrième séries, nous arrivons au même résultat que si nous avions appliqué successivement à la première la symétrie résultant des plans P et P′. Nous aurons

$$(\bar{q}q + r\bar{r}s) \qquad (\bar{r}\bar{q}q + rs) \qquad (q + r\bar{r}\bar{q}s),$$
$$(q\overline{q + rr}s) \qquad (rq\overline{q + r}\bar{s}) \qquad (\overline{q + r}rqs).$$

On peut donc dresser le tableau suivant :

DEMI-FORME DIRECTE			
I. A^3	II. $A^{3\times 2}$	III. $3L^2$	IV. $3L'^2$
$qr\overline{q+r}s$ $r\overline{q+r}qs$ $\overline{q+r}qrs$	$\bar{q}\bar{r}q+rs$ $\bar{r}q+r\bar{q}s$ $q+r\bar{q}\bar{r}s$	$q\overline{q+r}r\bar{s}$ $rq\overline{q+r}\bar{s}$ $\overline{q+r}rq\bar{s}$	$\bar{q}q+r\bar{r}\bar{s}$ $\bar{r}\bar{q}q+r\bar{s}$ $q+r\bar{r}\bar{q}\bar{s}$
DEMI-FORME INVERSE			
V. C	VI. Π	VII. 3P	VIII. 3P′
$\bar{q}\bar{r}q+r\bar{s}$ $\bar{r}q+r\bar{q}\bar{s}$ $q+r\bar{q}\bar{r}\bar{s}$	$qr\overline{q+r}\bar{s}$ $r\overline{q+r}q\bar{s}$ $\overline{q+r}qr\bar{s}$	$\bar{q}q+r\bar{r}s$ $\bar{r}\bar{q}q+rs$ $q+r\bar{r}\bar{q}s$	$q\overline{q+r}rs$ $rq\overline{q+r}s$ $\overline{q+r}rqs$

Didodécaèdre. — Ces 24 faces se répartissent de la manière suivante : Au-dessus du plan principal, il y a une pyramide à 12 faces, dont 6 directement et 6 inversement semblables, se coupant toutes sur l'axe sénaire au même point. La première de ces demi-pyramides, composée des faces des colonnes I et II, coupe le plan principal suivant un hexagone régulier. Il en est de même de la seconde, formée des faces VII et VIII. Les deux hexagones, dont les côtés sont symétriques les uns des autres relativement aux plans non principaux, définissent par leur enchevêtrement, sur le plan principal, un dodécagone non régulier, comprenant deux espèces d'angles et dont les côtés sont les bases de triangles scalènes, formant les faces de la pyramide. Une pyramide semblable existe au-dessous du plan principal, se raccordant avec la première suivant le même dodécagone, et ainsi la forme oblique est un ***Didodécaèdre*** ou double pyramide dihexagonale (fig. 130).

Sur la figure 131, on voit les deux hexagones définis, l'un par la direction $H_2H'_1$ de l'intersection de la face déterminante avec le plan principal, l'autre par la ligne $H_2H'_2$, symétrique de la première relativement au plan de première

espèce PP'. Le dodécagone, dont tous les sommets sont situés sur les axes binaires, possède, dans l'exemple choisi, des angles relativement aigus en 1, 1, 1,..., sur les axes de première espèce et des angles plus ouverts en 2, 2, 2,..., sur les axes de deuxième espèce. Les faces de la pyramide sont

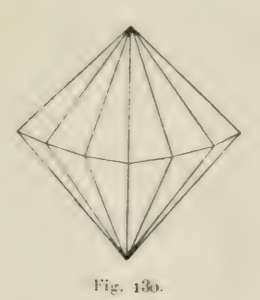


Fig. 130.

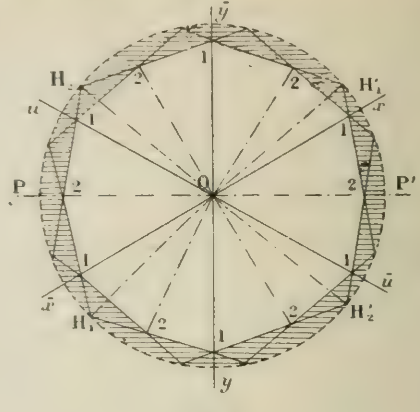


Fig. 131.

des triangles scalènes, dont les bases, 12, 21, sont égales entre elles et dont les côtés O1, situés sur les plans de symétrie de seconde espèce, sont plus longs que les côtés O2, placés sur les plans de première espèce, et correspondant à des angles plus ouverts.

Si l'on joint de deux en deux les sommets du dodécagone, on obtient deux hexagones réguliers, dont l'un, celui des sommets 1, est parallèle aux axes binaires de première espèce, tandis que l'autre est parallèle aux axes binaires de deuxième espèce.

Perspective stéréographique. — Les perspectives stéréographiques, sur un plan parallèle au plan principal de symétrie, des douze pôles situés au-dessus du plan du tableau, sont indiquées sur la figure 132, qui, si l'on donne aux caractéristiques les valeurs convenables, pourra également servir à déterminer les notations des faces des formes restreintes. Pour simplifier l'écriture, on a désigné par j la caractéristique auxiliaire. Il n'est pas dificile de voir que la face déterminante $(qrj\bar{s})$, qui doit avoir ses caractéristiques qrs positives, se trouve entre Ox' et Ou' ; car c'est seulement entre les points x' et $\bar{u}'$ qu'une tangente AB au cercle fondamental ou, ce qui revient au même, une perpendiculaire au rayon OC, mené par le centre O et la perspective d'un pôle, rencontre à la fois Ox et Oy dans leurs parties positives. Or cette direction AB est celle de l'intersection de la face déterminante avec le plan prin-

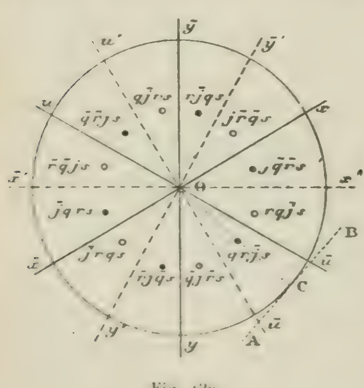


Fig. 132.

cipal de symétrie, cette face venant d'ailleurs couper l'axe sénaire en un point dont la perspective se confond avec O. Les faces directement semblables à $(qr\bar{j}s)$ sont marquées par un point noir ; les faces inversement semblables sont distinguées par un petit cercle.

Formes restreintes : A. Formes parallèles. — 1° *A l'axe sénaire :*

La rencontre avec Oz a lieu à l'infini, c'est-à-dire que $s = 0$. Le symbole est donc

$$\{ qr\overline{q+r}o \}.$$

La face déterminante, tournant autour de l'axe sénaire, engendre un prisme à base d'hexagone régulier. Chacune des faces prismatiques tournant autour de l'axe binaire voisin, il en résulte un second prisme de même nature, dont l'enchevêtrement avec le premier fait naître un *prisme dodécagonal*. En définitive, c'est le dodécagone de la figure 131 qui, au lieu de servir de base commune à deux pyramides, devient la section d'un prisme à angles alternativement plus et moins ouverts.

Fig. 133.

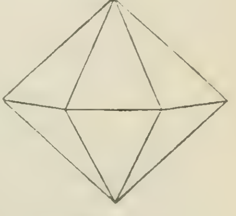
2° *Aux axes binaires de première espèce :*

Dans ce cas, la face déterminante, coupant l'axe Oz à la distance $\frac{1}{s} \times c$, doit rencontrer le plan principal suivant une ligne parallèle à l'un des axes de première espèce. Soit $x\bar{u}$ cette ligne (fig. 133), parallèle à l'axe Oy. Si $Ox = \frac{1}{q} \times a$, a étant le paramètre des axes choisis, on voit que la longueur $Oy = \infty$ et, comme Ou est évidemment égal à $O\bar{x}$, $\frac{1}{j} = -\frac{1}{q}$.

Par suite, le symbole est :

$$\{ qo\bar{q}s \}.$$

La rotation autour de Oz engendre une pyramide ayant pour base un hexagone régulier, dont les côtés sont parallèles aux axes de première espèce. Dautre part, chaque face, comme celle qui a pour base $x\bar{u}$, tournant autour de l'axe binaire Ox, en donne une autre qui rencontre Oz au-dessous du plan du tableau, mais dont l'intersection avec le plan principal se confond avec $x\bar{y}$. On obtient donc, sous le plan du tableau, une pyramide identique avec la première et formée, comme elle, de six triangles isocèles. La forme résultante est un dihexaèdre, appelé *Isocéloèdre de première espèce* ou *Protoisocéloèdre* (fig. 134).


Fig. 134.

3° *Aux axes binaires de deuxième espèce.*

Ces axes étant bissecteurs des angles formés par les axes de première espèce,

la face déterminante, parallèle à $y\bar{y}'$, doit couper le plan principal suivant une ligne xy (fig. 133), de telle sorte que $Ox = Oy$, c'est-à-dire $q = r$. Dès lors, la caractéristique de OA, qui est égale à $q + r$, devient $2r$ (1) et le symbole est

$$\{ rr\overline{2r}s \}.$$

La forme résultante est évidemment un dihexaèdre identique avec le précédent, dont il ne diffère que par son orientation, les arêtes de sa base étant parallèles aux axes de deuxième espèce. C'est le *Deutéroisocéloèdre*.

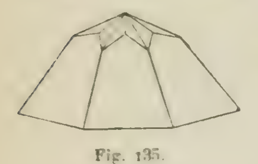


Fig. 135.

La figure 135 représente un pointement dans lequel un didodécaèdre coexiste avec un isocéloèdre, dont il tronque l'angle au sommet.

B. Formes normales. — 1° *A l'axe sénaire* :

Le symbole est évidemment

$$\{ 0001 \}$$

et la forme se compose de deux faces parallèles ou *bases*, qui servent à limiter les prismes du système.

3° *Aux axes binaires de première espèce* :

Toute face normale aux axes binaires est, par cela même, parallèle à l'axe sénaire et engendre un prisme. La section droite de ce prisme est un hexagone régulier, dont les côtés, normaux aux axes de première espèce, sont, pour cette raison, parallèles aux axes de deuxième espèce. La forme rentre donc dans le symbole $(rr\overline{2r}s)$, où l'on a fait $s = 0$. Cela donne $(rr\overline{2r}0)$ ou, puisque r est en facteur commun, $\{11\overline{2}0\}$. C'est le *prisme hexaèdre* dit *de deuxième espèce* (parce que c'est aux axes de cette espèce que ses faces sont parallèles) ou *deutéroprisme hexagonal.*

3° *Aux axes binaires de deuxième espèce* :

La forme est un prisme hexagonal régulier, dont la section droite a ses côtés parallèles aux axes binaires en question. C'est le *protoprisme hexagonal* ou prisme de première espèce, ayant pour notation $(qo\bar{q}o)$ ou $(10\bar{1}0)$.

§ 2

FORMES COMPOSÉES. NOTATION DE LÉVY. PERSPECTIVE STÉRÉOGRAPHIQUE

Dérivation des formes. — Dans la notation de Lévy, la forme primitive du système sénaire est le *protoprisme hexagonal* $\{10\bar{1}0\}$, combiné avec ses *bases* $\{0001\}$. Tandis que ces dernières sont notées p (fig. 136), les faces du

(1) On peut le voir directement sur la figure 133, car $OA = Oy \cos 60° = \frac{1}{2} Oy$. Donc $\frac{1}{j} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{r}$ ou $j = 2r$.

prisme sont des faces m. Tous les angles, identiques entre eux comme points de concours d'une arête verticale et de deux arêtes horizontales parallèles à deux axes binaires de première espèce, sont notés a. Les arêtes horizontales s'appellent b et les arêtes verticales, parallèles à l'axe sénaire, c'est-à-dire à la *hauteur* du prisme, reçoivent la notation h. Les axes binaires de deuxième espèce sont les lignes joignant de deux en deux les sommets a.

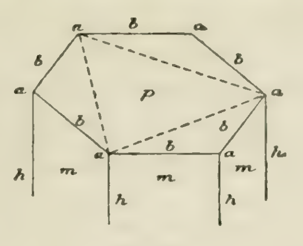


Fig. 136.

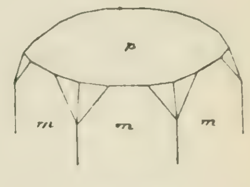


Fig. 137.

Le *didodécaèdre* résulte d'une double modification sur les angles a, substituant à ces angles une couple de facettes (fig. 137) qui interceptent, sur les arêtes b, deux longueurs proportionnelles à $\frac{1}{q}$ et $\frac{1}{r}$ et, sur l'arête h, une longueur proportionnelle à $\frac{1}{s}$.

La notation doit donc être

$$\left\{ b^{\frac{1}{q}} \quad b^{\frac{1}{r}} \quad h^{\frac{1}{s}} \right\}.$$

Ainsi, $\{12\bar{3}3\}$ s'écrit $b^1\, b^{\frac{1}{2}}\, h^{\frac{1}{3}}$, et $\{13\bar{4}2\}$, $b^1\, b^{\frac{1}{3}}\, h^{\frac{1}{2}}$.

Le *prisme dodécagonal* résulte de la substitution, aux arêtes h, d'une couple de faces verticales, dont chacune intercepte sur les arêtes b les deux longueurs exprimées par $\frac{1}{q}$ et $\frac{1}{r}$. On lui donne pour notation

$$h^{\frac{\frac{1}{q}}{\frac{1}{r}}} = h^{\frac{r}{q}}.$$

On convient de prendre $r > q$. $\{12\bar{3}0\}$ s'écrit h^2.

Le *protoisocéloèdre* a ses faces parallèles aux axes binaires de première espèce, c'est-à-dire aux arêtes b. Chaque arête de la base se trouve ainsi remplacée par une facette tangente (fig. 138), dont les trois coefficients d'intersection sont $\frac{1}{0}, \frac{1}{q}, \frac{1}{s}$.

Le symbole devrait donc être

$$b^{\frac{1}{0}}\, b^{\frac{1}{q}}\, h^{\frac{1}{s}}.$$

On le simplifie en écrivant

$$b^{\frac{\frac{1}{q}}{\frac{1}{s}}} \quad \text{ou} \quad b^{\frac{s}{q}}.$$

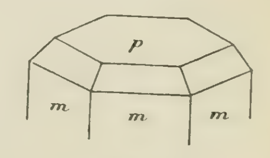


Fig. 138.

Le *deutéroisocéloèdre* est parallèle aux axes binaires de deuxième espèce, qui sont les lignes joignant de deux en deux les sommets de l'hexagone de base.

Chacune de ses faces est donc une troncature symétrique sur les angles a (fig. 139), interceptant, sur les arêtes b, deux longueurs égales, définies par $\frac{1}{r}$ et, sur l'arête h, une longueur proportionnelle à $\frac{1}{s}$. La notation sera $a^{\frac{s}{r}}$.

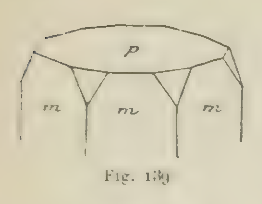


Fig. 139.

$\{11\bar{2}1\}$ est a^1, et $\{22\bar{4}1\}$ est $a^{\frac{1}{2}}$.

Nous avons dit que les *bases* avaient pour notation p et que le symbole du *protoprisme* est m.

Quant au *deutéroprisme*, il n'est évidemment qu'un cas particulier du prisme dodécagonal, celui où $r = q$. Sa notation est donc h^1.

Perspective stéréographique. Relations de zones. — La figure 140 représente une perspective stéréographique du système hexagonal sur un plan normal à l'axe principal. On voit du premier coup d'œil les positions que doivent occuper les pôles des formes p, m, h^1. Les prismes dodécagonaux ont leurs pôles sur le grand cercle fondamental. Les protoisocéloèdres, parallèles aux axes de première espèce, sont par cela même normaux aux plans de symétrie de même espèce. Les perspectives de leurs pôles doivent donc se trouver sur celles des axes de deuxième espèce. Inversement les perspectives des axes de première espèce sont les lieux des pôles des deutéroisocéloèdres.

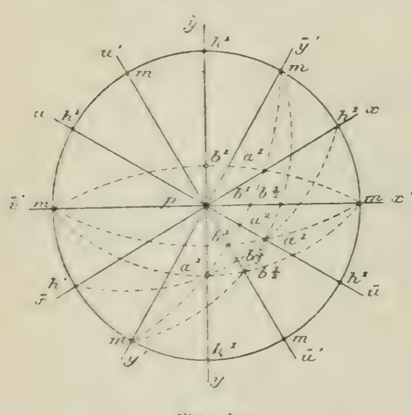


Fig. 140.

La figure met en outre en évidence certaines relations de zones, sur lesquelles il est bon d'insister un peu.

Rappelons d'abord que, pour fixer la valeur du paramètre de l'axe principal relativement à celle des paramètres des axes binaires, il suffit, parmi toutes les deutéropyramides de notation $a^{\frac{s}{r}}$, d'en choisir une, pour laquelle on admet que $s = 1$ et $r = 1$. Ce choix étant fait et la position du pôle a^1 étant ainsi déterminée par la connaissance de l'angle que fait, avec la base p, cette face choisie pour représenter a^1, toutes les notations des autres faces vont s'ensuivre.

Deux faces a^1 adjacentes, par exemple celle dont le pôle est sur $p\bar{u}$, qui a pour notation $\{11\bar{2}1\}$, et celle dont le pôle est sur py et qui s'exprime par $\{\bar{1}2\bar{1}1\}$, forment une zone dont l'axe, calculé d'après une formule connue, a pour symbole $(\bar{1}\bar{2}3)$. La condition pour qu'un protoisocéloèdre $b^{\frac{s}{q}}$ ou $(oq\bar{q}s)$, ayant son pôle sur $p\bar{u}'$, fasse partie de cette zone, sera

$$-2q + 3s = 0 \quad \text{ou} \quad s = \frac{2}{3}q.$$

La notation de cette pyramide, dont les faces sont *tangentes* aux intersections mutuelles des faces de a^1, est donc $b^{\frac{2}{3}}$.

Maintenant, une face $\{11\bar{2}1\}$ de a^1, ayant son pôle sur $p\bar{u}$, et la face adjacente m, ou $(10\bar{1}0)$, dont le pôle est sur px', forment une zone de symbole $(01\bar{1})$. Un protoisocéloèdre $b^{\frac{q}{s}}$ ou $\{0q\bar{q}s\}$ fera partie de cette zone, si l'on a $q - s = 0$ ou $q = s$. Ce sera donc la pyramide b^1 qui jouira de cette propriété.

Deux faces adjacentes de b^1, ayant pour pôles : l'une $(10\bar{1}1)$, situé sur px' ; l'autre $(01\bar{1}1)$, sur $p\bar{u}'$, formeront une zone $(\bar{1}\bar{1}1)$, à laquelle appartiendra le deutéroisocéloèdre a^r ou $\{rr\overline{2r}s\}$, pourvu que $-r - r + s = 0$ ou $s = 2r$. C'est la pyramide a^2.

Enfin, on verrait de même que $b^{\frac{1}{2}}$ forme zone avec une face de a^1 et les deux faces m dont les pôles occupent les deux extrémités du diamètre normal à pa^1.

Toutes ces relations de zones peuvent être prévues géométriquement. En effet, soit SABCDEF (fig. 141) la projection du protoprisme m, couronné par la protopyramide fondamentale b^1, coupant l'axe sénaire à une hauteur qu'on prendra comme égale à l'unité de paramètre de cet axe. Considérons la face SAB, qui, tangente à l'arête AB, intercepte sur CB à partir de C et, par conséquent aussi sur AF à partir de F, une longueur égale à l'unité du paramètre des axes de première espèce, ayant pour symbole $(\bar{1}01\bar{1})$. La face déterminante de la deutéropyramide fondamentale $\{11\bar{2}1\}$ doit avoir pour trace AC et couper d'ailleurs l'axe sénaire au même point que SAB. Donc SAC contient les deux intersections SA et SC de deux faces adjacentes b^1 avec leurs voisines. Mais ces intersections ne sont autres que les rencontres de ces deux faces b^1 avec des plans verticaux respectivement parallèles aux deux faces AB et BC de m. Donc deux cercles b^1m de la figure 140, tels que celui qui va de y' à $\bar{y}'$ et celui qui, partant de mx', aboutit à $\bar{m}\bar{x}'$, doivent venir se croiser sur ph^1x au pôle a^1.

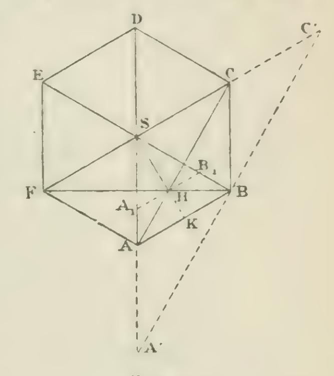


Fig. 141.

Une deutéropyramide tangente à l'arête SB coupe les axes en C' et A', à des distances doubles de l'origine. Son symbole est donc $\left\{\frac{1}{2}\frac{1}{2}\bar{1}1\right\}$ ou $(11\bar{2}2)$, ce qui correspond à a^2. Ainsi a^2 forme zone avec deux faces b^1 adjacentes. Enfin deux faces a^1 adjacentes, telles que AC et FB, se croisent en H, au centre du triangle équilatéral SAB, c'est-à-dire que $SH = \frac{2}{3}$ SK. Une protopyramide tangente à l'arête SH coupe donc les axes, par exemple SA, à une distance $SA_1 = \frac{1}{q}a = \frac{2}{3}a$, a étant le paramètre. Le symbole $\frac{s}{q}$ devient ainsi $\frac{1}{3}$: 2 ou $\frac{2}{3}$; par suite, c'est $b^{\frac{2}{3}}$ qui forme zone avec deux faces a^1 adjacentes.

Détermination de la forme primitive. Rapport d'axes. — Considérons un protoisocéloèdre $b^{\frac{s}{q}}$ ou $\{qoqs\}$, assis sur une arête b, laquelle intercepte, sur deux axes consécutifs de première espèce, deux longueurs égales entre elles et ayant pour valeur $\frac{a}{q}$. Si, dans le plan de la base p, on abaisse, du centre de l'hexagone, une perpendiculaire sur cette arête b, sa longueur sera (le triangle étant équilatéral) :

$$\frac{a}{q} . \cos 30^\circ = \frac{1}{2} \cdot \frac{a}{q} \sqrt{3}.$$

Or le rapport de la longueur $\frac{c}{s}$, interceptée sur l'axe vertical, à cette perpendiculaire, est justement la tangente de l'angle que la face $b^{\frac{s}{q}}$ fait avec le plan de la base p. Soit α cet angle ; on a

$$\frac{\frac{c}{s}}{\frac{1}{2}\frac{a}{q}\sqrt{3}} = \frac{2cq}{sa.\sqrt{3}} = tg\alpha.$$

Supposons que le protoisocéloèdre b^1 soit choisi pour déterminer la forme primitive, c'est-à-dire que l'on admette $s = 1$ et $q = 1$. La formule devient

$$\frac{2c}{a\sqrt{3}} = tg\alpha \text{ ou } \frac{c}{a} = \frac{1}{2}\sqrt{3}. tg\alpha.$$

Si, au lieu de la pyramide b^1, on voulait partir de la deutéropyramide a^1, β étant l'angle de la face a^1 avec la base p, on aurait

$$\frac{c}{a} = \frac{1}{2} tg \beta.$$

Enfin, si l'on voulait prendre pour point de départ l'angle γ de deux faces adjacentes de b^1, compté sur l'arête culminante, on aurait (1)

$$\frac{3}{2}\frac{a^2}{c^2} = \frac{2 \cos \gamma - 1}{1 - \cos \gamma}.$$

On a l'habitude de prendre a pour unité. Dans ce cas, les formules deviennent :

$$c = \frac{1}{2}\sqrt{3}\, tg\, \alpha, \qquad c = \frac{1}{2} tg\, \beta, \qquad c^2 = \frac{3}{2} \times \frac{1 - \cos \gamma}{2 \cos \gamma - 1}.$$

Le paramètre des axes de première espèce étant 1, les axes de deuxième espèce, qui sont les diagonales des rhombes de 60 degrés, ont pour paramètre $\sqrt{3}$.

(1) Voir Mallard, *Traité de Cristallographie*, I.

§ 3

FORMES MÉRIÉDRIQUES

Polyèdres holoaxes hémisymétriques. — Le symbole est

$$\Lambda^6,\ 3L^2.\ 3L'^2.$$

La réduction ne peut porter que sur la forme oblique à 24 faces. Les six faces qui viennent couper l'axe sénaire au-dessus du plan du tableau, lequel a cessé d'être un plan principal, dessinent sur ce plan un hexagone régulier. La pyramide inférieure en dessine un autre, s'enchevêtrant avec le premier et, si l'on se reporte à la figure 131, il est aisé de voir que chaque face de l'une des pyramides en rencontre deux de la pyramide opposée. Sa base est donc formée d'une ligne brisée, au coude de laquelle aboutit une arête de l'autre pyramide. Cette face se réunit d'ailleurs, avec les deux faces adjacentes de la pyramide dont elle fait partie, au même point de l'axe sénaire. Sa forme est celle d'un quadrilatère. Le polyèdre résultant, composé de deux pyramides hexagonales, qui se raccordent suivant un dodécagone en zigzag, est le *Trapézoèdre hexagonal* (fig. 142).

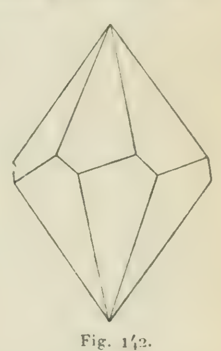


Fig. 142.

En combinaison avec la protoprisme, cette forme se traduit, sur chaque angle, par une seule facette oblique. Aux deux extrémités d'une même arête verticale, les facettes ne sont pas symétriques l'une de l'autre relativement au plan normal.

Polyèdres hémiaxes principaux. — Nous donnerons ce nom, avec Bravais, aux polyèdres privés d'axes binaires, mais conservant l'axe sénaire intact. Il y en a trois variétés :

1°	Hémiaxes	principaux	centrés.	Λ^6, C, Π
2°	—	—	dichosymétriques.	Λ^6, 3P, 3P'
3°	—	—	hémisymétriques.	Λ^6

Il est clair que tous les axes binaires doivent être supprimés ; car, si l'on en gardait un, la rotation autour de l'axe sénaire reproduirait les autres.

Le premier cas est le plus important, parce qu'il est le seul, ou à peu près, qui soit réalisé dans la nature. On voit sans peine que, sur la forme oblique, il se traduit par la disparition de l'une des doubles pyramides hexagonales, dont la pénétration produit le didodécaèdre. Il en résulte une double pyramide à base d'hexagone régulier, ou *bipyramide hexagonale*, dont les côtés ne sont ni parallèles ni perpendiculaires aux axes binaires. C'est l'hémiédrie *pyramidale* des Allemands. Les prismes dodécagonaux sont transformés en prismes hexago-

naux non orientés. Les isocéloèdres, qui sont toujours normaux aux plans de symétrie, n'ont rien à souffrir de la suppression de ces derniers, et le centre suffit pour restituer à chaque face la face symétrique qu'on eût obtenue par rotation autour d'un axe binaire. Ces formes ne sont donc pas altérées par le fait des polyèdres hémiaxes centrés, non plus que le protoprisme et le deutéroprisme.

C'est ainsi que l'apatite offre (fig. 143) la combinaison de la base $p = \{0001\}$, du protoprisme $m = \{01\bar{1}0\}$, des protoisocéloèdres $b^1 = \{01\bar{1}1\}$, $b^{\frac{1}{2}} = \{02\bar{2}1\}$, du deutéroisocéloèdre $a^1 = \{11\bar{2}1\}$ et de l'hémididodécaèdre $x = \frac{1}{2}\{b^1\ b^{\frac{1}{2}}\ h^1\} = \frac{1}{2}\{12\bar{3}1\}$. Les facettes de ce dernier, obliquant toutes dans le même sens autour d'une même base p, se correspondent symétriquement de part et d'autre de chaque arête h.

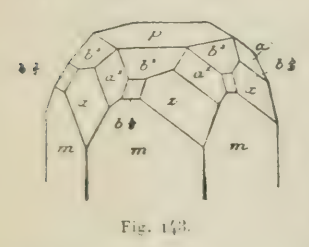


Fig. 143.

Le deuxième cas entraîne la suppression de toutes les faces situées au-dessous du plan du tableau; par suite, tandis qu'il respecte les formes parallèles à l'axe sénaire, il produit sur toutes les autres le phénomène de l'*hémimorphisme*, c'est-à-dire que le cristal est muni, à l'une des extrémités de l'axe sénaire, de faces qui ne se trouvent pas à l'autre. La forme oblique se change en *pyramide dihexagonale.*

Enfin le troisième cas, qui est, en quelque sorte, une hémiédrie du cas précédent, produit un hémimorphisme, qui ne s'applique d'ailleurs qu'aux didodécaèdres, transformés en *pyramides hexagonales*, et aux isocéloèdres, tandis que les prismes dodécagonaux se transforment en prismes hexagonaux.

Polyèdres hémiaxes non principaux. — Toutes les combinaisons possibles sont exprimées par les formules suivantes :

(1)	Λ^3,	$3L^2$,	C,	3P
(2)	Λ^3,	$3L'^2$,	C,	3P'
(3)	Λ^3,	$3L^2$,	II,	3P'
(4)	Λ^3,	$3L'^2$,	II,	3P
(5)	Λ^3,	$3L^2$		
(6)	Λ^3,	$3L'^2$		

Les combinaisons (1), (2), (5) et (6) appartiennent aussi au système ternaire, avec lequel elles seront examinées. Nous nous bornerons ici à constater que la symétrie ternaire peut se déduire géométriquement de la symétrie sénaire, par application des règles relatives aux formes mériédriques; ce qui n'empêche pas les deux systèmes d'avoir, en principe, chacun leur existence distincte.

Les combinaisons (3) et (4), qui ne diffèrent l'une de l'autre que par l'orientation des axes et des plans conservés, transforment le didodécaèdre en une double pyramide à six faces ou *bipyramide ditrigonale*. La base de cette pyramide est un hexagone irrégulier (fig. 144), aux angles alternativement plus et

moins ouverts, qui résulte de l'association de deux triangles équilatéraux. En effet, si AB est la face déterminante, elle se répète d'abord, relativement à l'axe sénaire, en BC et CA, formant un triangle équilatéral. Ensuite, les plans de symétrie conservés étant précisément ceux qui passent par les axes Ox, Oy, Ou, AB se répète, relativement à Ou, par exemple, en A'B', et ainsi naît une pyramide ayant pour base l'hexagone DEFGHK. Cette pyramide se répète d'ailleurs symétriquement au-dessous du plan principal II, qui a été conservé. Le même hexagone devient la base du prisme à six pans qui, dans ce système, se substitue au prisme dodécagonal. Si les axes conservés sont ceux de première espèce, les protoisocéloèdres et le protoprisme ne sont pas affectés, leurs faces se répétant relativement aux plans qui passent par les axes. Mais les deutéroisocéloèdres et le deutéroprisme, étant normaux aux plans de symétrie conservés, perdent la moitié de leurs faces. Ils se transforment respectivement en doubles pyramides et en prisme à base de triangle équilatéral, dont les côtés sont parallèles aux axes binaires supprimés.

Polyèdres tétartoaxes. — La symétrie sénaire admet des polyèdres tétartoaxes, dont les symboles sont :

(1) A^3, C
(2) A^3, 3P′
(3) A^3, 3P
(4) A^3, II
(5) A^3

Fig. 144.

Les trois premières combinaisons appartiennent aussi à la symétrie ternaire.

La quatrième, appliquée à la forme oblique, donne évidemment une double pyramide trièdre (*bipyramide trigonale*), ayant pour base un triangle équilatéral tel que ABC (fig. 144), dont les côtés sont obliques sur tous les axes binaires. Elle transforme les prismes dodécagonaux en prismes triangulaires de même base que la pyramide trièdre, tandis que les isocéloèdres et les prismes hexagonaux des deux espèces prennent une base triangulaire équilatérale, parallèle aux axes binaires des espèces correspondantes.

La cinquième combinaison, qui peut aussi appartenir au système ternaire, comporte la suppression, par hémimorphisme, de la moitié des faces de la combinaison précédente. Elle donne donc simplement une *pyramide trigonale*

Tableau des formes simples du système hexagonal.

SYMBOLES DES FORMES HOLOÉDRIQUES			PRINCIPALES VARIÉTÉS DE POLYÈDRES MOLÉCULAIRES						
			HOLOAXES centrés	HOLOAXES hémisymétriques	HÉMIAXES PRINCIPAUX centrés	HÉMIAXES PRINCIPAUX dichosymétriques	HÉMIAXES PRINCIPAUX hémisymétriques	HÉMIAXES NON PRINCIPAUX dichosymétriques	TÉTARTOAXES PRINCIPAUX
FORME OBLIQUE		$\{q\,r\,\overline{q+r}\,s\}$ $b^{\frac{1}{q}}\,b^{\frac{1}{r}}\,h^{\frac{1}{s}}$	Didodécaèdre	Trapézoèdre hexagonal	Dodécaèdre hexagonal régul. non orienté	Pyramide dodécaédrique indéfinie	Pyramide hexagonale régul. indéfinie non orientée	Dodécaèdre à base d'hexagone irrégulier	Double pyramide à base de triangle équilatéral non orienté
FORMES PARALLÈLES		$\{q\,r\,\overline{q+r}\,o\}$ $h^{\frac{r}{q}}$	Prisme dodécagonal	Prisme dodécagonal	Prisme hexagonal régul. non orienté	Prisme dodécagonal	Prisme hexagonal régul. non orienté	Prisme à base d'hexagone irrégulier	Prisme triangulaire équilatéral non orienté
		$\{q\,o\,\bar{q}\,s\}$ $b^{\frac{s}{q}}$	Protoisocéloèdre	Protoisocéloèdre	Protoisocéloèdre	Pyramide hexaédrique indéfinie	Pyramide hexaédrique indéfinie	Protoisocéloèdre	Double pyramide triangulaire équilatérale
		$\{r\,r\,\overline{2r}\,s\}$ $a^{\frac{s}{r}}$	Deutéro-isocéloèdre	Deutéro-isocéloèdre	Deutéro-isocéloèdre	Pyramide hexaédrique indéfinie	Pyramide hexaédrique indéfinie	Double pyramide à base de triangle équilatéral	Double pyramide triangulaire équilatérale
FORMES NORMALES		$\{0001\}$ p	Bases	Bases	Bases	Une seule base	Une seule base	Bases	Bases
		$\{11\bar{2}0\}$ h^1	Deutéroprisme hexagonal	Deutéroprisme hexagonal	Deutéroprisme hexagonal	Deutéroprisme hexagonal	Deutéroprisme hexagonal	Prisme triangulaire équilatéral	Prisme triangulaire équilatéral
		$\{10\bar{1}0\}$ m	Protoprisme hexagonal	Protoprisme hexagonal	Protoprisme hexagonal	Protoprisme hexagonal	Protoprisme hexagonal	Protoprisme hexagonal	Prisme triangulaire équilatéral

CHAPITRE III

SYSTÈME QUATERNAIRE OU QUADRATIQUE

§ I

NOYAU ET FORMES SIMPLES DU SYSTÈME

Noyau de l'assemblage quaternaire. — La maille de l'assemblage quaternaire, dans le plan normal à l'axe multiple, est un carré, dont les côtés et les diagonales représentent les axes binaires.

Soit ABCD (fig. 145) cette maille carrée. Si les nœuds du réseau limitrophe se projettent sur ABCD, le noyau est évidemment un prisme droit, ayant pour base AABD et, pour hauteur, la distance, d'ailleurs quelconque, des deux plans limitrophes. C'est un *prisme droit quadratique*.

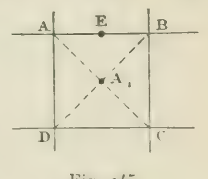


Fig. 145.

Si les nœuds du réseau limitrophe se projettent sur les centres des carrés, par exemple en A_1, comme les nœuds du troisième plan doivent se projeter sur ABCD, on peut donner comme noyau à l'assemblage un prisme droit, ayant pour bases le carré ABCD du premier plan et le carré superposé du troisième plan, tandis qu'il contient en son milieu un nœud appartenant au plan intermédiaire. C'est un *prisme quadratique centré*.

Jamais d'ailleurs un nœud ne peut se projeter au milieu de l'intervalle AB, par exemple ; car s'il s'y projetait, en E, le point E devrait être le pied d'un axe quaternaire, ce qui n'est pas, une rotation de 90° amenant le nœud A dans une position qui ne coïncide pas avec celle d'un nœud existant.

En résumé, il n'y a dans ce système que deux modes admissibles : le mode *quadratique simple* et le mode *quadratique centré*. Il suffit de construire un dessin semblable à la figure 43 (relative au mode cubique centré), pour voir que le véritable noyau du second mode quadratique est un parallélépipède dont toutes les arêtes, égales entre elles, ont pour longueur la demi-diagonale de l'un des prismes. Toutes les faces sont donc des rhombes ; mais ces rhombes ne sont pas égaux entre eux. Il y en a quatre égaux qui forment un prisme et deux différents, parallèles l'un à l'autre, qui limitent ce prisme.

Le symbole de la symétrie quaternaire est

$$A^4,\ 2L^2,\ 2L'^2,\ C,\ \Pi,\ 2P,\ 2P'.$$

Représentons en perspective (fig. 146) le prisme quadratique. La ligne QQ', menée par le centre O perpendiculairement aux deux bases, et telle qu'une

rotation de 90° autour de cette ligne opère la substitution des sommets, est l'axe *quaternaire*, de paramètre OQ. Dans la section droite $CC_1C'C'_1$, menée par O parallèlement aux bases, les lignes BB' et $B_1B'_1$, parallèles aux côtés des carrés de base, sont telles, qu'en imprimant au noyau une rotation de 180° autour de chacune d'elles, on remplace simplement la base du haut par celle du bas et réciproquement. Ce sont donc des axes binaires identiques, au paramètre double de OB. Les diagonales CC', $C_1C'_1$, forment aussi deux axes binaires, mais différents des premiers, auxquels ils ne peuvent pas être substitués, et de paramètre égal à OC.

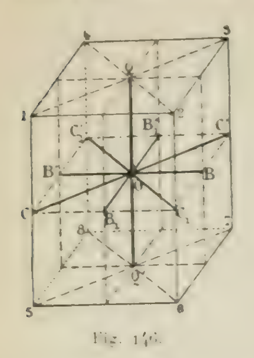


Fig. 146.

La section droite $CC_1\ C'\ C'_1$ est évidemment le plan de symétrie principal Π, normal à l'axe quaternaire. Les plans menés par QQ' et BB', QQ' et $B'_1B'_1$, parallèlement aux faces verticales du prisme, sont les plans de symétrie de première espèce (2P), tandis que les plans diagonaux QCQ'C', $QC_1Q'C'_1$ sont les plans de symétrie de seconde espèce (2P'). La disposition des sommets, par rapport aux premiers, est évidemment différente de ce qu'elle est relativement aux seconds.

Les traces, sur le plan principal, des plans P coïncident avec les axes L et celles des plans P' avec les axes L'.

Forme oblique. — La forme oblique doit comprendre $2 \times \{1 + 3 + 4\} = 16$ faces, dont on peut obtenir la dérivation de la manière suivante :

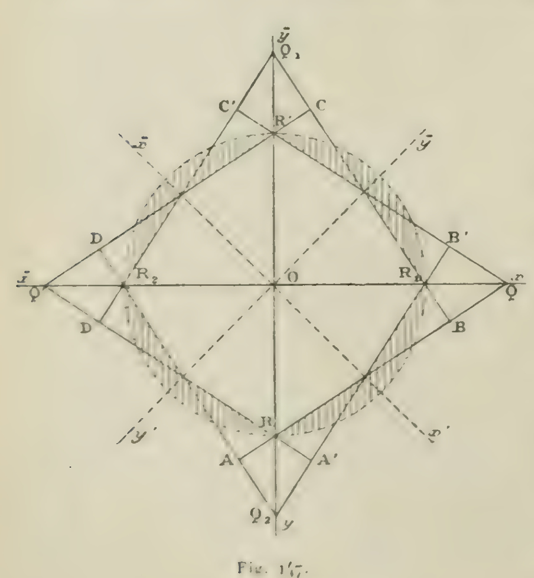


Fig. 147.

Soit RQ (fig. 147) la trace, sur le plan principal, de la face déterminante (*qrs*), interceptant, sur O*x*, $OQ = \frac{1}{q} \times a$, sur O*y*, $OR = \frac{1}{r}\, a$, *a* étant le paramètre commun des deux axes binaires de première espèce, et, sur l'axe quaternaire, une longueur égale à $\frac{1}{s} \times c$, *c* étant le paramètre de cet axe. Si l'on fait tourner la face déterminante de 180° autour de O, considéré seulement comme axe binaire, on aura une deuxième position Q'R', répondant évidemment au symbole $(\bar{q}\bar{r}s)$. Mais si l'on restitue à l'axe quater-

naire sa valeur, on obtient les positions R_1Q_1 ou $(r\bar{q}s)$ et R_2Q_2 ou $(\bar{r}qs)$. Les quatre positions déterminent par leur ensemble un carré ABCD.

Si maintenant on fait tourner chacune des faces autour d'un axe binaire de première espèce, RQ donne QR′, qui correspond à $(q\bar{r}\bar{s})$, l'intersection ayant lieu au-dessous du plan du tableau. Cela revient à changer le signe des deux dernières caractéristiques, ce qui, avec $(\bar{q}\bar{r}s)$, donne $(\bar{q}r\bar{s})$, $(rq\bar{s})$ et $(\bar{r}\bar{q}\bar{s})$. Les quatre nouvelles positions forment un second carré A′B′C′D′, symétrique du premier.

Ainsi la demi-forme directe comprend les huit faces suivantes :

I. Λ^2	II. $\Lambda^{2\times 2}$	III. $2L^2$	IV. $2L'^2$
$q\,r\,s$ $\bar{q}\,\bar{r}\,s$	$r\,\bar{q}\,s$ $\bar{r}\,q\,s$	$q\,\bar{r}\,\bar{s}$ $\bar{q}\,r\,\bar{s}$	$r\,q\,\bar{s}$ $\bar{r}\,\bar{q}\,\bar{s}$

Il est aisé de voir que les deux dernières faces peuvent être directement déduites des deux premières à l'aide des axes de seconde espèce.

En changeant tous les signes, on obtiendra la demi-forme inverse :

V. C, Π	VI. »	VII. 2P	VIII. 2P′
$\bar{q}\,\bar{r}\,\bar{s}$ $q\,r\,\bar{s}$	$\bar{r}\,q\,\bar{s}$ $r\,\bar{q}\,\bar{s}$	$\bar{q}\,r\,s$ $q\,\bar{r}\,s$	$\bar{r}\,\bar{q}\,s$ $r\,q\,s$

Le centre de symétrie accompagnant toujours le plan principal, la colonne V a pour en-tête C, Π. La septième est obtenue par le changement des signes de la troisième, ce qui revient à faire tourner *qrs* de 180° autour d'un axe de première espèce, puis à repéter la nouvelle position relativement au centre. Or ce mouvement produit le même résultat que si l'on prenait directement la position symétrique de *qrs* relativement au plan de symétrie auquel l'axe en question est perpendiculaire. Donc la colonne VII doit avoir pour en-tête 2P et la colonne VIII, 2P′.

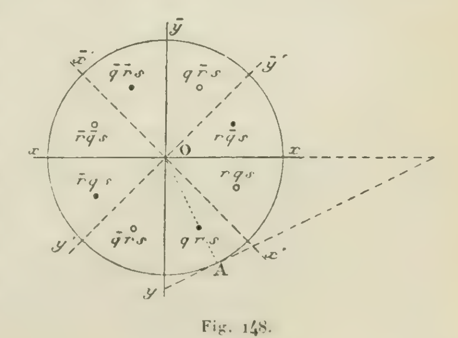


Fig. 148.

Pour savoir dans quel cas les faces de la colonne VI devront appartenir à une forme mériédrique, il suffira de se souvenir que, le nombre des faces étant toujours 4, 8 ou 16, le nombre des colonnes à conserver doit toujours être pair.

Les seize faces de la forme oblique constituent deux pyramides identiques, raccordées, sur le plan principal, par un octogone non régulier, qui résulte de la pénétration mutuelle des deux carrés ABCD, A′B′C′D′ (fig. 147). C'est ce qu'on appelle un *dioctaèdre*. Les faces de ce dioctaèdre sont des triangles non isocèles, dont les plus longs côtés coïncident, en projection, dans l'exemple choisi, avec les axes de première espèce.

Dans une perspective stéréographique sur le plan principal, les pôles se répartissent conformément à la figure 148, où la face déterminante (qrs) doit être dans le secteur x' Oy, si l'on veut que q soit plus petit que r, c'est-à-dire que la longueur $\frac{1}{q} \times a$, interceptée sur Ox par la perpendiculaire au rayon OA, soit plus grande que la longueur $\frac{1}{r} \times a$, interceptée sur Oy.

Formes restreintes. 1° Formes parallèles. 1° *A l'axe quaternaire* :

Le symbole, correspondant à $\frac{1}{q} = \infty$, est (qro). Les pôles sont situés sur le cercle fondamental et la forme est un *prisme octogonal* indéfini, ayant pour base l'octogone non régulier de la figure 147.

2° *Aux axes binaires de première espèce* :

Dans ce cas, la face déterminante coupe le plan fondamental suivant une ligne parallèle à Ox ou à Oy. L'une des caractéristiques horizontales est nulle et la forme prend pour symbole (qos) ou (ors). Les pôles, au nombre de huit, sont situés sur les plans de symétrie de première espèce. La forme est une double pyramide, ayant pour base commune un carré dont les côtés sont parallèles aux axes de première espèce. On lui donne le nom de *quadratoctaèdre* (ou *octaèdre quadratique*) *de première espèce*, et encore celui de *protopyramide*. Parmi les diverses formes de cette série, on convient d'en choisir une, définie par l'inclinaison de ses faces, relativement au plan principal de symétrie, pour déterminer les paramètres des axes. On admet alors $q = 1$, $s = 1$, et la forme, de symbole (101), est le *quadratoctaèdre fondamental* ou la *protopyramide fondamentale*.

3° *Aux axes binaires de deuxième espèce.*

Ces axes étant bissecteurs des angles formés par Ox et Oy, l'intersection de la face déterminante avec le plan fondamental doit être à 45 degrés sur ces deux axes. Donc $q = r$ et le symbole est (rrs). Les pôles sont situés sur les plans de symétrie de deuxième espèce et la forme est un *quadratoctaèdre de deuxième espèce* ou une *deutéropyramide*, c'est-à-dire une double pyramide, dont la base de raccordement est un carré parallèle aux axes de deuxième espèce. La forme (111) est la deutéropymide fondamentale.

L'une des faces d'une protopyramide étant (qos), la face adjacente est (oqs). La zone formée par ces deux faces a pour symbole

$$-sq,\ -sq,\ q^2 \quad \text{ou } \bar{s},\ \bar{s},\ q.$$

Pour qu'une deutéropyramide $\{r'r's'\}$ fasse partie de la même zone, il faut d'abord qu'elle coupe l'axe quaternaire au même point que la première, c'est-à-dire que $s' = s$. Alors la condition devient $-2r's + qs = 0$ ou $2r' = q$. D'après cela, deux faces adjacentes de la pyramide (101) forment zone avec une face intermédiaire de la pyramide $\left\{\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1\right\}$ ou $\{112\}$. De même, une face (rrs) et la face adjacente $(\bar{r}rs)$ donnent lieu à la zone $0, -2rs, 2r^2$ ou $0, \bar{s}, r$. Pour qu'une protopyramide $\{0qs\}$ en fasse partie, il faut qu'on ait $-sq + sr = 0$ ou $q = r$. Ainsi deux faces adjacentes de $\{111\}$ font zone avec une face intermédiaire de $\{011\}$ ou $\{101\}$.

Fig. 149

Deux pyramides d'ordre différent, et dont l'une est ainsi *tangente* aux arêtes de l'autre, sont dites *conjuguées*. Leur coexistence engendre un polyèdre analogue à celui de la figure 149.

2° **Formes normales.** — 1° *A l'axe quaternaire* :

Ce sont deux faces parallèles ou *bases*, de symbole (001).

2° *Aux axes binaires de première espèce* :

On voit de suite que la forme est un *prisme quadratique de première espèce* ou *protoprisme quadratique*, de notation (100).

3° *Aux axes binaires de deuxième espèce* :

C'est un *prisme quadratique de deuxième espèce* ou *deutéroprisme quadratique* (110).

§ 2

FORMES COMPOSÉES, NOTATION DE LÉVY. PERSPECTIVE STÉRÉOGRAPHIQUE

Choix des axes. — Dans la notation de Lévy, la forme primitive du système quadratique est un prisme droit à base carrée. Mais ce prisme n'est pas le protoprisme (100) de la notation à trois caractéristiques. C'est le deutéro-

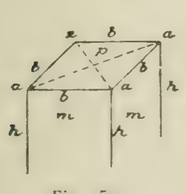


Fig. 150.

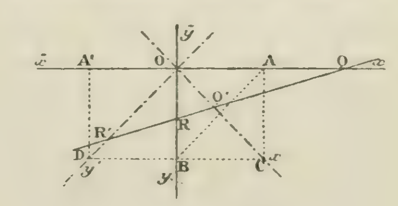


Fig. 151.

prisme (110). Les faces verticales (fig. 150) sont notées m, tandis que la base est p. Tous les angles ont une même valeur et sont marqués a. Les arêtes horizontales, parallèles aux axes de deuxième espèce, portent la notation b, les

arêtes verticales, parallèles à l'axe quaternaire, étant notées h. Ce sont les diagonales de la base qui représentent les axes de première espèce.

D'après cela, les troncatures devront être définies, non plus par les longueurs interceptées sur les axes de première espèce, longueurs proportionnelles à $\frac{1}{q}$ et $\frac{1}{r}$, mais par celles interceptées sur les axes de deuxième espèce. Soient q', r', s' les caractéristiques d'une face rapportées à ces derniers axes. Si l'on considère (fig. 151) la ligne RQ, qui détermine la face, cette ligne coupe les nouveaux axes en R' et Q'. Mais Ox' a pour paramètre la diagonale OC du carré construit sur les paramètres OA et OB de Ox et Oy. Donc on a, d'après un théorème connu :

$$q' = q + r. \qquad \text{(A)}$$

D'autre part, OB pouvant être considéré comme la diagonale du parallélogramme OABD, construit sur OA, paramètre de Ox, et OD, paramètre de Oy', on a :

$$r = r' + q$$

ou

$$r' = -q + r. \qquad \text{(B)}$$

D'ailleurs, $s' = s$, puisque rien n'est changé à l'axe vertical. Ainsi, de la connaissance de (qrs), il est facile de passer à celle de $(q'\ r'\ s')$. Pour faire l'opération inverse, il suffit de remarquer que, en combinant les équations (A) et (B), on obtient :

$$q = \frac{q' - r'}{2} \qquad r = \frac{q' + r'}{2} \qquad s = s',$$

ou, en multipliant tout par 2, pour avoir des caractéristiques entières,

$$q = q' - r \qquad r = q' + r' \qquad s = 2s'.$$

Ces formules permettent de passer de l'un à l'autre des deux systèmes.

Symboles des formes. — Cherchons maintenant les symboles des diverses formes. Le dioctaèdre est évidemment représenté par

$$b^{\frac{1}{q'}} \quad b^{\frac{1}{r'}} \quad h^{\frac{1}{s'}},$$

c'est-à-dire par $b^{\frac{1}{q+r}} \quad b^{\frac{1}{r-q}} \quad h^{\frac{1}{s}}.$

Ainsi {133} devient $b^{\frac{1}{4}} \quad b^{\frac{1}{2}} \quad h^{\frac{1}{3}}.$

Lorsque $q' = s'$ (c'est-à-dire $q + r = s$), on se sert du symbole

$$a_{\frac{r'}{q'}} = a_{\frac{r-q}{q+r}}.$$

Ainsi {123} devient $a_{\frac{1}{3}}.$

Pour $r' = s'$ ou $r - q = s$, on prend le symbole

$$a_{\frac{q'}{r'}} = a_{\frac{q+r}{r-q}}.$$

Ainsi {132} devient a_2

En combinaison avec le prisme m et la base p, le dioctaèdre donne, sur chaque angle a, deux facettes symétriques, placées comme celles du didodécaèdre du système sénaire. Avec le prisme seul, on obtient la pyramide à huit faces de la figure 152.

Les prismes octogonaux sont produits par des biseaux placés sur les arêtes h et interceptant, sur les deux arêtes b, des longueurs proportionnelles à $\frac{1}{q'}$ et $\frac{1}{r'}$. Leur notation est

$$h^{\frac{q'}{r'}} \quad \text{ou} \quad h^{\frac{r+q}{q}}.$$

Fig. 152.

Ainsi {120} devient h^3

Les protopyramides de Lévy sont déterminées par des faces parallèles aux arêtes b et interceptant : sur l'autre arête b, $\frac{1}{q'}$; sur l'arête h, $\frac{1}{s'}$. Leur symbole est donc

$$b^{\frac{s'}{q'}}.$$

D'autre part, dans la notation à trois caractéristiques rapportées aux axes de première espèce, ces faces appartiennent à des deutéropyramides de notation {rrs}, dérivées de {qrs} où $q = r$. Dans ce cas particulier, la formule (A) donne $q' = 2r$. Donc le symbole $b^{\frac{s'}{q'}}$ devient $b^{\frac{s'}{2r}}$. Ainsi la protopyramide fondamentale de Lévy, répondant à la deutéropyramide {111}, a pour symbole $b^{\frac{1}{2}}$.

La figure 153 représente une protopyramide en combinaison avec la base p et le prisme m. Dans la figure 154, la protopyramide est complète.

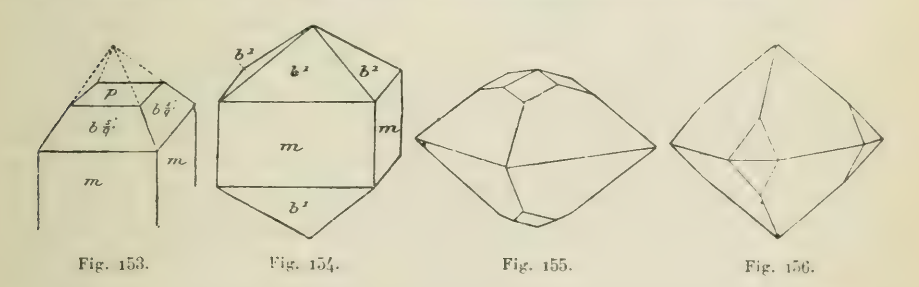


Fig. 153. Fig. 154. Fig. 155. Fig. 156.

Les deutéropyramides de Lévy sont des troncatures symétriques opérées sur les angles a et répondent évidemment au symbole $(r'\, r'\, s')$ ou $a^{\frac{s'}{r'}}$. D'autre part, elles représentent les protopyramides {$q\, o\, s$} ou {$o\, r\, s$} de l'autre système. Dans ce cas, $r' = -q + r = o + r = r$ et $s' = s$. Donc $a^{\frac{s'}{r'}}$ se transforme en $a^{\frac{s}{r}}$, et ainsi la deutéropyramide fondamentale a^1 répond à la protopyramide fondamentale {011} ou {101}.

Les figures 155 et 156 représentent les combinaisons d'une protopyramide et d'une deutéropyramide.

Quant au deutéroprisme de Lévy, il est évident que sa notation est h^1 et qu'il correspond au protoprisme $\{100\}$.

Relations de zones. — Lorsqu'une pyramide $a^{\frac{s}{r}}$ est combinée avec le prisme m, les faces de cette pyramide sont des losanges. En effet, chacune d'elles, telle que SABC (fig. 157), rencontre la face adjacente SBDE suivant un plan de symétrie de première espèce, c'est-à-dire parallèle à une face m. L'intersection mutuelle SB est donc la même que celle de SABC avec un plan vertical, parallèle à la face m aboutissant à AG. Donc cette face m elle-même doit être coupée par SABC suivant une ligne parallèle à SB. Donc SABC est un parallélogramme. D'ailleurs ce parallélogramme doit être symétrique relativement à la trace SC d'un plan de symétrie de première espèce. Donc c'est un losange.

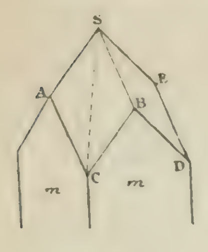


Fig. 157.

La figure 158 représente la perspective stéréographique du système quadratique sur le plan principal de symétrie. Une fois qu'on a choisi la position du pôle $b^{\frac{1}{2}} = \{111\}$, il suffit de joindre ce pôle au pôle h^1 le plus voisin pour obtenir, par l'intersection de ce cercle avec la ligne joignant p à l'autre pôle adjacent h^1, le pôle de la pyramide a^1. Le cercle de zone de deux faces a^1 adjacentes fournit le pôle b^1 et la jonction de b^1 avec h^1 adjacent donne un cercle contenant le pôle a^2. Ces diverses relations peuvent être vérifiées à l'aide des formules des zones.

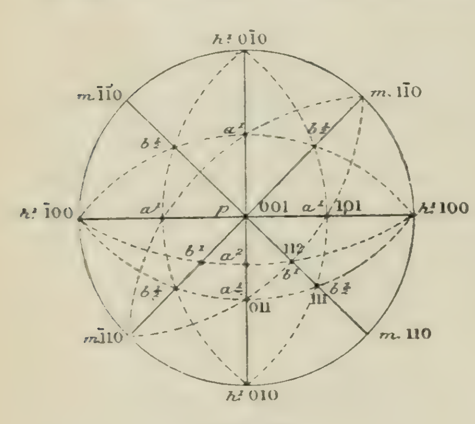


Fig. 158.

Mais on peut aussi s'assurer directement qu'une fois que le protoprisme a été choisi, la deutéropyramide fondamentale doit avoir ses faces tangentes aux intersections mutuelles des faces de la protopyramide fondamentale. En effet, soit ABCD (fig. 159) le protoprisme de Lévy, c'est-à-dire le deutéroprisme de Miller et celui qui, par conséquent, intercepte sur les axes OA et OB des longueurs égales à l'unité du paramètre de ces axes. Soit OABCD la projection orthogonale de la protopyramide fondamentale, laquelle, par hypothèse, coupe l'axe quaternaire à une distance du plan de la base égale à l'unité du paramètre de cet axe. La deutéropyramide, qui doit venir couper l'axe quaternaire au même point, doit en outre, puisqu'elle est une protopyramide de Miller et répond

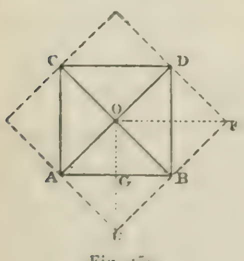


Fig. 159.

au symbole $\{101\}$, rencontrer les axes OA et OB aux points A et B. Donc sa face déterminante est projetée en OEF, c'est-à-dire qu'elle est tangente en OB à l'arête d'intersection de deux faces adjacentes de la protopyramide. D'ailleurs cette intersection OB est aussi celle des faces de la protopyramide fondamentale avec un plan vertical COB, parallèle à deux des faces du deutéroprisme de Lévy. Donc deux faces opposées de ce deutéroprisme font zone avec deux faces adjacentes de la protopyramide fondamentale et une face intermédiaire de la deutéropyramide fondamentale. On voit d'ailleurs que, si cette dernière est notée a^1, ce qui suppose $OE = OF = 1$, la protopyramide définie par AOB interceptera, sur OE, une longueur $OG = \frac{1}{q} = \frac{1}{2}$. Donc $q = 2$ et comme le symbole est $b^{\frac{s}{q}}$, que d'ailleurs $s = 1$, la protopyramide fondamentale, *avec ce choix d'axes*, doit être notée $b^{\frac{1}{2}}$.

On verrait de même qu'une protopyramide tangente à OE, c'est-à-dire à l'intersection mutuelle de deux faces adjacentes de la deutéropyramide a^1, intercepterait sur OE une longueur égale à l'unité et devrait être notée b^1. D'ailleurs, OE étant aussi l'intersection des faces de a^1 par un plan parallèle aux côtés AC et BD du prisme m, il y aurait zone entre deux faces opposées du protoprisme, deux faces adjacentes de a^1 et une face intermédiaire de b^1.

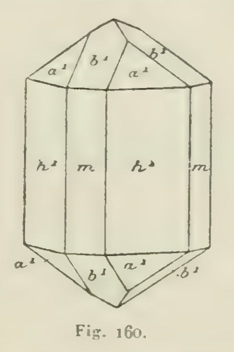


Fig. 160.

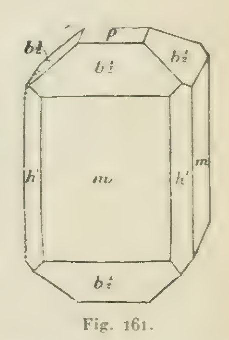


Fig. 161.

La figure 160 représente la combinaison, réalisée dans la cassitérite ou oxyde d'étain, des deux prismes m et h^1 avec les pyramides a^1 et b^1. Dans la figure 161, les deux prismes sont associés à la protopyramide $b^{\frac{1}{2}}$, dont le sommet est tronqué par la base p.

Détermination de la forme primitive. Rapport d'axes. — La symétrie quaternaire se reconnaît, dans les cristaux naturels, à l'existence de deux plans de symétrie identiques et rectangulaires l'un à l'autre, auxquels s'ajoute un troisième plan, normal à tous deux et d'espèce différente. Il reste ensuite à déterminer ce qu'on appelle la *forme primitive*, c'est-à-dire les dimensions du prisme quadratique fondamental. Il suffit pour cela de fixer ce qu'on appelle communément le rapport $\frac{b}{h}$, c'est-à-dire, dans notre notation habituelle, $\frac{a}{c}$, autrement dit la relation qui existe entre le paramètre des arêtes horizontales et celui des arêtes verticales.

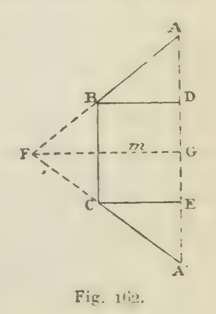


Fig. 162.

Considérons un octaèdre quadratique qui, par sa fréquence, nous paraît mériter d'être regardé comme fondamental. S'il est établi sur les arêtes b, nous admettrons qu'il représente $b^{\frac{1}{2}}$. Dans ce cas, soit ABCA' (fig. 162) la projection, sur un plan parallèle à m, de la moitié du cristal formé par m et $b^{\frac{1}{2}}$. Le rapport $\frac{BD}{AD}$, c'est-à-dire $\frac{FG}{AG}$, est représenté par la cotangente de l'angle AFG. Cet angle est la moitié de l'angle dièdre des deux faces AB et A'C, qu'on peut mesurer directement ou conclure de l'angle de AB avec la face verticale BC; c'est $\frac{1}{2}\, b^{\frac{1}{2}}\, b^{\frac{1}{2}}$ sur m.

Mais si l'on se reporte à la figure 159, on voit que OG, qui n'est autre que BD (fig. 162), est égal à OB $\frac{\sqrt{2}}{2}$ ou $b\,\frac{\sqrt{2}}{2}$.

Donc
$$\frac{b\sqrt{2}}{2h} = cot\,\frac{1}{2}\, b^{\frac{1}{2}} b^{\frac{1}{2}}\ (\text{sur } m)$$

ou
$$\frac{b}{h} = \sqrt{2}\ cot\,\frac{1}{2}\, b^{\frac{1}{2}}\, b^{\frac{1}{2}}\ (\text{sur } m) = \sqrt{2}\ tg\,\frac{1}{2}\, b^{1/2}\, b^{1/2}\ (\text{sur } p)$$

On trouverait de même (en se rappelant que la pyramide a^1 a ses faces tangentes aux arêtes culminantes de $b^{\frac{1}{2}}$) que

$$\frac{b}{h} = cot\,\frac{1}{2}\, a^1\, a^1\ (\text{sur } h^1) = tg\,\frac{1}{2}\, a^1\, a^1\ (\text{sur } p).$$

Ordinairement, on fait $b = 1$; alors le paramètre h de l'axe vertical (c'est-à-dire c) est donné par l'une des deux formules :

$$h = \frac{\sqrt{2}}{2}\, cot\,\frac{1}{2}\, b^{\frac{1}{2}}\, b^{\frac{1}{2}}\ (\text{sur } p), \qquad h = cot\,\frac{1}{2}\, a^1\, a^1\ (\text{sur } p).$$

Si, au lieu des angles sur p, on avait seulement les angles de deux faces adjacentes de $b^{\frac{1}{2}}$ ou de a^1, on se reporterait à la perspective stéréographique, où l'on voit sans peine qu'on a

$$cos\, b^{\frac{1}{2}}\, b^{\frac{1}{2}}\ \text{adj.} = cos^2\, p b^{\frac{1}{2}}, \qquad cos\, a^1\, a^1\ \text{adj.} = cos^2\, p a^1.$$

Or $pb^{\frac{1}{2}}$, dans cette formule, est la moitié du supplément de l'angle vrai $b^{\frac{1}{2}}\, b^{\frac{1}{2}}$ sur p; de même, pa^1 est la moitié du supplément de l'angle $a^1\, a^1$ sur p. On remarquera seulement que, dans les deux dernières formules, $b^{\frac{1}{2}}\, b^{\frac{1}{2}}$ et $a^1\, a^1$ désignent les angles *des normales* aux faces correspondantes et non les dièdres vrais.

Le paramètre des axes de première espèce étant 1, celui des axes de l'autre espèce (donc les côtés du carré de base) est évidemment $\frac{\sqrt{2}}{2}$.

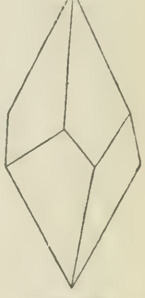
§ 3

FORMES MÉRIÉDRIQUES

Série des formes. Polyèdres holoaxes. — La série des formes mériédriques du système quaternaire est exprimée par le tableau suivant :

Var. holoaxe.	1.	Λ^4,	$2L^2$,	$2L'^2$	
Var. hémiaxes	2.	Λ^4,	C.	Π	Polyèdres hémiaxes principaux
	3.	Λ^4,	2P,	2P'	
	4.	Λ^4			
	5.	Λ^2,	$2L^2$,	2P'	Polyèdres hémiaxes non principaux
	6.	Λ^2,	$2L'^2$,	2P	

Il est évident que les variétés 5 et 6 ne peuvent être centrées ; autrement le centre, combiné avec les plans conservés, restituerait les axes binaires déficients et alors l'axe principal redeviendrait quaternaire.


Fig. 163.

L'effet du premier mode, qui ne peut se traduire que sur la forme oblique, est de combiner deux pyramides carrées, l'une supérieure, ayant pour base le carré ABCD de la figure 147, l'autre, inférieure, ayant pour base le carré A'B'C'D'. Chaque face d'une pyramide rencontre deux faces adjacentes de la même pyramide et deux autres de la pyramide inférieure. Elle forme donc un quadrilatère et les deux pyramides se raccordent suivant un octogone en zigzag dont les côtés, égaux deux à deux seulement, sont alternativement plus ou moins inclinés sur le plan normal à l'axe quaternaire (fig. 163). C'est le *trapézoèdre trigonal*.

Polyèdres hémiaxes. — Le deuxième mode transforme évidemment le dioctaèdre en une double pyramide quadratique ou *bipyramide tétragonale*, dont la base est, par exemple, le carré ABCD, les côtés de ce carré étant sans relation avec les axes binaires. Les prismes octogonaux deviennent quadratiques de la même façon ; mais les octaèdres demeurent intacts, ainsi que le protoprisme et le deutéroprisme. Sur un de ces prismes, ce genre d'hémiédrie se traduira, par exemple, par des facettes verticales remplaçant les arêtes prismatiques et inégalement inclinées sur les deux faces adjacentes. Le molybdate de plomb, qui affecte ce mode mériédrique, offre la combinaison p, $b^{\frac{1}{2}}$, $x = \frac{1}{2} h^2$ (fig. 164).

Le 3e et le 4e modes, dont il n'y a d'ailleurs pas d'exemples connus, donneraient des cristaux hémimorphes, l'un à huit (*pyramide ditétragonale*), l'autre à quatre facettes pyramidales (*tritopyramide tétragonale*), s'il s'agit de la forme oblique.

Les 5e et 6e modes, d'ailleurs identiques quant à leurs effets, ont pour résultat

la suppression de la moitié des faces de la forme oblique. Les deux pôles de chacun des secteurs xOy et $\bar{x}O\bar{y}$ (fig. 148, p. 147) étant conservés au-dessus du plan du tableau, on conserve, au-dessous, ceux des secteurs $xO\bar{y}$ et $\bar{x}Oy$. La forme résultante est représentée dans la figure 165.

Les prismes octogonaux échappent à ce genre d'hémiédrie, grâce à la conservation simultanée des axes L et des plans P'. Si nous supposons que la

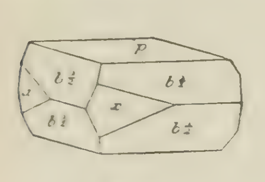
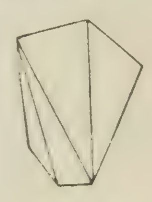
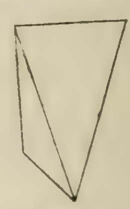


Fig. 164.


Fig. 165.


Fig. 166.

combinaison réalisée soit Λ^2, $2L^2$, $2P'$, les octaèdres de première espèce de Miller, dont les pôles se répètent relativement aux plans P', ne sont pas affectés. En revanche, la suppression des plans P entraîne celle de la moitié des faces des octaèdres de deuxième espèce, qui se transforment ainsi en *tétraèdres* non réguliers ou *sphénoèdres* (fig. 166), dont les faces sont des triangles isocèles. La variété hémiédrique de la forme oblique (fig. 165) peut ainsi être considérée

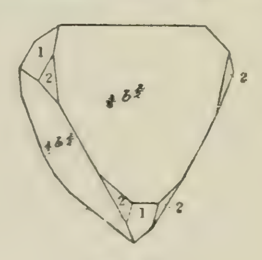


Fig. 167.

comme un sphénoèdre à faces doubles ou *disphénoèdre*. C'est aussi le *scalénoèdre tétragonal*.

Quant aux prismes quadratiques, ils ne subissent aucune réduction.

Ce mode d'hémiédrie est réalisé dans la pyrite de cuivre, qui offre les combinaisons p, m, a^1, h^1, $\frac{1}{2}\,b\frac{1}{2}$; ou, comme dans la figure 167, $\frac{1}{2}\,b\frac{1}{2}$ direct, combiné avec les facettes numérotées 1 et 2, savoir : $1 = \frac{1}{2}\,b\frac{1}{2}$ inverse, moins développé, et $2 = a\frac{1}{2}$.

On pourrait concevoir des polyèdres tétartoaxes dichosymétriques Λ^2, $2P$, lesquels différeraient de L^2, P', P'' du système terbinaire en ce que les deux plans seraient de même espèce.

Tableau des formes simples du système quaternaire ou quadratique.

SYMBOLES DES FORMES HOLOÉDRIQUES		NATURE DU POLYÈDRE PARTICULAIRE					
		HOLOAXE centré	HOLOAXE hémisymétrique	HÉMIAXE PRINCIPAL centré	HÉMIAXE PRINCIPAL dichosymétrique	HÉMIAXE PRINCIPAL hémisymétrique	HÉMIAXE NON PRINCIPAL dichosymétrique
FORME OBLIQUE	$\{qrs\}$ $b^{\frac{1}{q+r}}\, b^{\frac{1}{r-q}}\, h^{\frac{1}{s}}$	Dioctaèdre	Hémidioctaèdre	Octaèdre quadratique non orienté	Pyramide octogonale indéfinie	Pyramide quadratique indéfinie non orientée	Disphénoèdre
FORMES PARALLÈLES	$\{qro\}$ $h^{\frac{r+q}{r-q}}$	Prisme octogonal	Prisme octogonal	Prisme quadratique non orienté	Prisme octogonal	Prisme quadratique non orienté	Prisme octogonal
	$\{qos\}$ $a^{\frac{s}{q}}$	Quadratoctaèdre de première espèce	Quadratoctaèdre de première espèce	Quadratoctaèdre de première espèce	Pyramide quadratique indéfinie	Pyramide quadratique indéfinie	Quadratoctaèdre de première espèce
	$\{rrs\}$ $b^{\frac{s}{2r}}$	Quadratoctaèdre de deuxième espèce	Quadratoctaèdre de deuxième espèce	Quadratoctaèdre de deuxième espèce	Pyramide quadratique indéfinie	Pyramide quadratique indéfinie	Sphénoèdre
FORMES NORMALES	$\{001\}$ p	Bases	Bases	Bases	Une seule base	Une seule base	Bases
	$\{100\}$ h^1	Protoprisme quadratique	Protoprisme quadratique	Protoprisme quadratique	Protoprisme quadratique	Protoprisme quadratique	Protoprisme quadratique
	$\{110\}$ m	Deutéroprisme quadratique	Deutéroprisme quadratique	Deutéroprisme quadratique	Deutéroprisme quadratique	Deutéroprisme quadratique	Deutéroprisme quadratique

CHAPITRE IV

SYSTÈME TERNAIRE OU RHOMBOÉDRIQUE

§ 1

NOYAU ET FORMES SIMPLES DU SYSTÈME

Noyau de l'assemblage. Rhomboèdre. — Nous avons vu (1) que, dans un assemblage ternaire, si l'on considère deux plans limitrophes 1 et 2, normaux à l'axe ternaire, la projection orthogonale du réseau 2 n'est autre que le réseau 1, déplacé parallèlement à lui-même, suivant la trace de l'un des plans de symétrie, des $\frac{2}{3}$ de la demi-distance qui sépare deux nœuds situés sur ce plan.

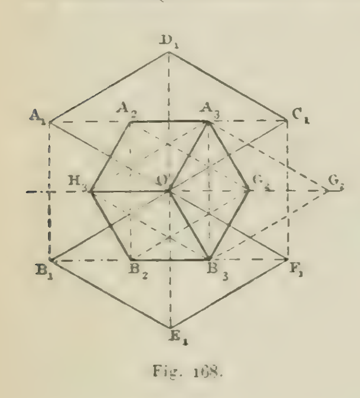


Fig. 168.

Ainsi, le réseau du plan 1 étant exprimé (fig. 168) par les deux losanges $A_1OC_1D_1$, $B_1OF_1E_1$, le triangle $A_2G_2B_2$ appartient au réseau n° 2. Pour la même raison, $A_3G_3B_3$ appartient au plan n° 3, la distance A_3A_2, égale à A_2A_1, étant toujours les $\frac{2}{3}$ de la hauteur du triangle équilatéral élémentaire A_1D_1O. Enfin, en dernière analyse, comme $A_3C_1 = A_1A_2$, la ligne A_1B_1 finit par se transporter en C_1F_1, c'est-à-dire que le *réseau du plan 4 se confond absolument avec celui du plan 1.*

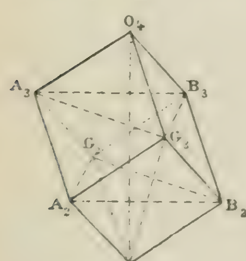


Fig. 169.

Cela posé, considérons simultanément (fig. 169) :

1° Dans le plan 1, le nœud O ;

2° Dans le plan 2, le triangle $A_2B_2G_2$;

3° Dans le plan 3, le triangle $A_3B_3G_3$ (qui correspond à $A_3B_3H_3$ de la figure 168) ;

4° Dans le plan 4, le nœud O_4, projeté orthogonalement en O.

Joignons maintenant le nœud O aux trois nœuds $A_2B_2C_2$, le nœud O_4 aux nœuds $A_3B_3G_3$, enfin joignons A_2A_3, A_3G_2, G_2B_3, B_3B_2, B_2G_3, G_3A_2.

Nous obtiendrons de cette façon un parallélépipède qui, ne contenant aucun nœud dans son intérieur, pourra être considéré comme le noyau de l'assem-

(1) V. plus haut, p. 53.

blage. Or toutes les lignes que nous venons de tracer sont égales entre elles; car étant toutes comprises entre des plans parallèles et de même distance normale, elles ont sur ces plans des projections égales. Elles sont de plus quatre à quatre parallèles. Ainsi le parallélépipède est formé de six *rhombes* ou losanges; c'est ce qu'on nomme un *rhomboèdre*. Ce rhomboèdre a pour *axe* la ligne OO_4, c'est-à-dire l'axe ternaire. Quant aux axes binaires, qui se projettent suivant OA_1, OB_1, OD_1 (fig. 168), ce sont évidemment les lignes menées du milieu de OO_4 (fig. 169) aux milieux de chacune des arêtes non culminantes, telles que A_2A_3, A_2G_3, etc. Les plans de symétrie, qui coïncident avec OA_3, OB_3, OG_3, sont les plans menés par l'axe OO_4 et les couples d'arêtes culminantes parallèles, comme O_4G_3 et OG_2. Les diagonales horizontales des losanges, comme A_2B_2, A_3G_3, ont précisément la direction des axes binaires. Quant aux diagonales inclinées, telles que OG_2, ce sont les traces, sur les faces du rhomboèdre, des plans de symétrie auxquels chacune de ces faces est normale.

Ainsi l'assemblage ternaire a pour noyau un rhomboèdre. De là le nom de ***système rhomboédrique***, qui lui est souvent donné.

Les six arêtes qui n'aboutissent pas à l'axe ternaire étant toutes inclinées du même angle, mais en sens contraires, sur le plan normal à cet axe, dessinent, par leurs projections sur ce plan, un hexagone régulier, tandis que, dans l'espace, elles forment un hexagone en zigzag, ayant ses six côtés égaux, chacun de ces côtés étant perpendiculaire à un axe binaire et, par suite, parallèle à un plan de symétrie.

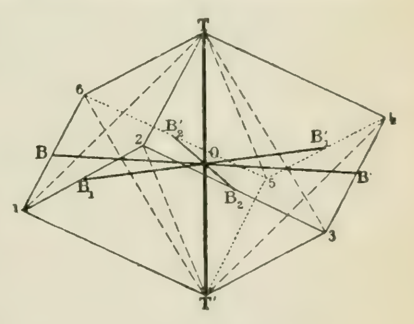


Fig. 170.

La figure 170 fait ressortir la position qu'occupent, dans le noyau rhomboédrique isolé, les divers éléments de symétrie, c'est-à-dire l'axe ternaire TT', les axes binaires BB', B_1B_1', B_2B_2', et les plans de symétrie, savoir, T1T'4, T3T'6, T5T'2. Chaque axe binaire, tel que BB', joint le milieu B d'une arête 1-6 de l'hexagone en zigzag au milieu B' de l'arête 3-4 opposée. On voit sans peine qu'une rotation de 180 degrés autour de BB' ne fait qu'opérer la substitution mutuelle des divers sommets. Le paramètre de l'axe ternaire étant OT, celui des axes binaires est OB.

Forme oblique. Notation à quatre caractéristiques. — La forme oblique générale du système ternaire doit avoir $2 \times (1 + 2 + 3) = 12$ faces.

Les axes binaires du système ternaire étant disposés comme les axes de même espèce du système sénaire, on peut, pour l'étude des formes obéissant à la symétrie ternaire, adopter un mode de représentation fondé sur l'emploi de l'axe principal et des trois axes binaires. On obtient alors une notation à

quatre caractéristiques (q, r, $\overline{q-r}$, s), identique avec celle du système sénaire et, pour connaître les faces dont se compose la forme oblique, il suffit, dans le tableau relatif à ce système, de conserver seulement les colonnes I, III, V, VI. On obtient de la sorte le tableau suivant et, en se reportant à la figure 132, on voit quels pôles doivent être conservés au-dessus du plan normal à l'axe ternaire, choisi pour plan de perspective, bien qu'il ait cessé, dans ce cas, d'être un plan de symétrie.

DEMI-FORME DIRECTE		DEMI-FORME INVERSE	
I. A^3	II. $3L^2$	III. C	IV. 3P
$q\,r\,\overline{q+r}\,s$	$q\,\overline{q-r}\,r\,\bar{s}$	$\bar{q}\,\bar{r}\,q+r\,\bar{s}$	$\bar{q}\,q+r\,\bar{r}\,s$
$r\,\overline{q+r}\,q\,s$	$r\,q\,\overline{q+r}\,\bar{s}$	$\bar{r}\,q+r\,\bar{q}\,\bar{s}$	$\bar{r}\,\bar{q}\,q+r\,s$
$\overline{q+r}\,q\,r\,s$	$\overline{q+r}\,r\,q\,\bar{s}$	$q+r\,\bar{q}\,\bar{r}\,\bar{s}$	$q+r\,\bar{r}\,\bar{q}\,s$

Notation à trois caractéristiques. Perspective stéréographique. — Mais il est encore plus avantageux de pouvoir exprimer la symétrie ternaire en fonction de trois éléments identiques. On choisit à cet effet les trois arêtes culminantes du rhomboèdre générateur, qui sont des rangées de même paramètre, et chaque face est définie par les longueurs qu'elle intercepte sur ces trois arêtes à partir d'une commune origine. En vertu de l'égalité des paramètres, ces longueurs sont rigoureusement proportionnelles à $\frac{1}{q}$, $\frac{1}{r}$ et $\frac{1}{s}$, comme dans le cas du système cubique.

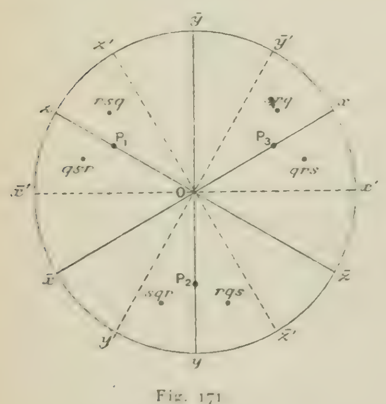


Fig. 171

De plus, si l'on choisit pour plan de projection le plan normal à l'axe ternaire, les trois arêtes culminantes, situées dans les plans de symétrie, se projetteront suivant trois lignes faisant entre elles des angles de 120 degrés. Enfin, ces lignes étant également inclinées sur le plan de projection, les longueurs interceptées sur chacune d'elles par une face donnée seront exactement entre elles dans le même rapport que leurs projections sur le plan normal.

Si l'on veut avoir une perspective stéréographique du système, on choisit ce plan normal comme plan fondamental et l'on représente les trois faces culminantes par leurs pôles, évidemment situés dans des plans de symétrie.

Soient (fig. 171) Ox, Oy, Oz les trois plans de symétrie, Ox', Oy', Oz', les

trois axes binaires. Si, par le centre O, on mène une normale à la face xOy, cette normale viendra en P_1, sur le plan de symétrie Oz, et les deux autres pôles P_2 et P_3 se placeront sur Oy et Ox, de telle sorte que l'arc de grand cercle, compris entre deux de ces pôles consécutifs, soit égal au supplément de l'angle dièdre des faces rhomboédriques culminantes. Supposons cette condition réalisée. La face xOy, normale à OP_1, a évidemment pour caractéristiques (001), puisqu'on peut la considérer comme menée par le point $s = 1$, parallèlement à Ox et à Oy, de telle sorte que $q = 0$, $r = 0$. De même, P_2 représente (010) et P_3 (100).

Détermination de la forme oblique. — Soit une face déterminante quelconque (qrs). Sa rotation autour de l'axe ternaire donnera, par permutation tournante,

[1] (qrs) (rsq) (sqr).

Maintenant faisons-la tourner de 180° autour des axes binaires. La rotation autour de Ox' subtitue Ox à $O\bar{z}$, Oy à $O\bar{y}$ et Oz à $O\bar{x}$. On a donc, pour qrs),

$$\bar{s}\bar{r}\bar{q},$$

ce qui revient à renverser l'ordre des caractéristiques en changeant les signes.

Les trois faces obtenues de cette façon seront

[2] $(\bar{s}\bar{r}\bar{q})$ $(\bar{q}\bar{s}\bar{r})$ $(\bar{r}\bar{q}\bar{s})$

Le changement des signes de [1] exprimera la symétrie relativement au centre, tandis que, en changeant les signes de [2], lesquels dérivent de [1] relativement aux axes, on obtiendra le même résultat qu'en exprimant directement la symétrie par rapport aux plans.

Il en résulte le tableau suivant :

DEMI-FORME DIRECTE		DEMI-FORME INVERSE	
I. A^3	II. $3L^2$	III. C	IV. 3P
qrs	$\bar{s}\bar{r}\bar{q}$	$\bar{q}\bar{r}\bar{s}$	srq
rsq	$\bar{q}\bar{s}\bar{r}$	$\bar{r}\bar{s}\bar{q}$	qsr
sqr	$\bar{r}\bar{q}\bar{s}$	$\bar{s}\bar{q}\bar{r}$	rqs

Cherchons dans quel secteur de la perspective devra tomber le pôle d'une face (qrs), telle que ses trois caractéristiques soient positives et que l'on ait $q > r > s$ (1). Soient (fig. 172) Ox, Oy, Oz les trois arêtes culminantes, Oy, par exemple, étant supposé en avant du plan qui contient Oz et Ox. Une face

(1) Cette condition, inverse de celle que nous avons admise pour le système cubique, est justifiée par le désir de garder la même position au secteur des coordonnées positives.

QRS, telle que l'on ait $OQ = \frac{1}{q}$ plus petit que $OR = \frac{1}{r}$ et cette dernière longueur plus petite que $OS = \frac{1}{s}$, est coupée en PS par le plan de symétrie $zO\bar{z}_1$, normal à la face xOy. Sa normale ON doit donc tomber entre PS et QS, c'est-à-dire, en perspective ou en projection, dans le secteur $xO\bar{z}_1$. Une face (111), également inclinée sur les trois arêtes, aurait pour normale l'axe ternaire lui-même et son pôle tomberait en O sur la perspective de la figure 171.

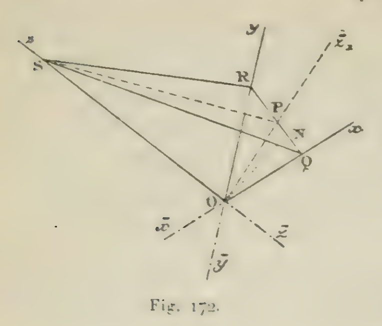
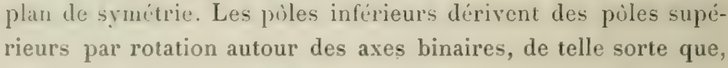


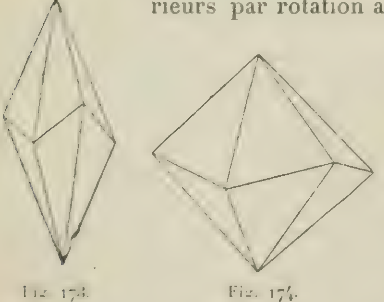
Fig. 172.

Scalénoèdre. — La position du pôle de la face déterminante (qrs) étant ainsi établie, on reconnaît sans peine que les six pôles de l'hémisphère supérieur, dont trois appartenant à la demi-forme directe et trois à la demi-forme inverse, se groupent deux par deux autour des plans de symétrie, comme l'indique la figure 171, donnant lieu à six faces qui viennent couper l'axe ternaire au même point, en formant une pyramide hexagonale. Cette pyramide coupe le plan normal à l'axe ternaire suivant un hexagone non régulier, résultant de la pénétration mutuelle de deux triangles équilatéraux symétriques, dont les côtés n'ont aucune relation avec les axes binaires. Les arêtes de cette pyramide, situées dans les plans de symétrie, sont alternativement longues et courtes. Dans l'exemple choisi, (qrs) étant dans le secteur xOx', on voit aisément que les arêtes courtes sont sur les parties positives Ox, Oy, Oz et les arêtes longues sur les parties négatives.

Quant à la portion de la forme située au-dessous du plan fondamental, elle ne peut être symétrique de la précédente ralativement à ce plan, qui n'est pas un



plan de symétrie. Les pôles inférieurs dérivent des pôles supérieurs par rotation autour des axes binaires, de telle sorte que, si l'on représentait l'hémisphère inférieur seul, on aurait une figure identique avec la figure 171, mais avec les pôles groupés autour des parties négatives, dans les secteurs précédemment inoccupés. De la sorte, la seconde pyramide aura ses arêtes courtes sur les plans de symétrie qui contiennent les arêtes longues de la première et réciproquement. Ainsi les deux pyramides devront se raccorder suivant des lignes inclinées, formant un hexagone en zigzag. Les côtés de cet hexagone rencontrent le plan fondamental sur les axes binaires, auxquels ils sont nécessairement perpendiculaires en leur milieu, et dessinent ainsi en projection un hexagone régulier. La forme résultante, formée de douze


Fig. 173. Fig. 174.

triangles scalènes, porte le nom de *scalénoèdre* (1). Le scalénoèdre peut être aigu, comme dans la figure 173, ou obtus, comme dans la figure 174.

Isocéloèdre. — Il y a un cas où l'hexagone de raccordement des pyramides devient plan et où les triangles scalènes se transforment en triangles isocèles. C'est lorsque les pôles (qrs) viennent se placer dans les plans qui contiennent à la fois l'axe ternaire et un axe binaire (fig. 175). Dans ce cas, en effet, les plans tangents à la sphère, menés par ces pôles, rencontrent le plan fondamental suivant une trace telle que AB, normale aux axes binaires et dont, par conséquent, la position n'est pas changée par une rotation de 180 degrés autour de ces axes. Cette même rotation ramène le pôle symétrique de (qrs) dans le plan projeté en $O\bar{x}'$. Alors, et par exception, le plan fondamental acquiert la même valeur que s'il était plan de symétrie.

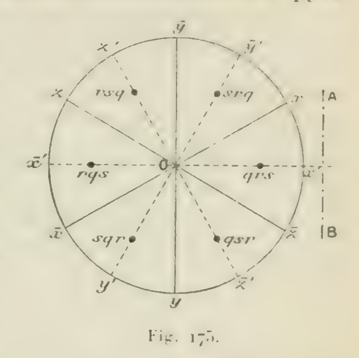


Fig. 175.

Il est facile d'indiquer la condition à laquelle doivent satisfaire les caractéristiques q, r et s, pour que cette disposition soit réalisée. La face (qrs) fait alors partie de la zone dont l'axe est $y\bar{y}$, perpendiculaire au plan Ox'. Cette zone comprend la face normale à l'axe ternaire, et dont évidemment les caractéristiques sont (111) et la face normale au plan fondamental, dont la trace est AB et dont, par conséquent, le symbole est $(10\bar{1})$. Son axe est donc $(\bar{1}2\bar{1})$; par suite, on doit avoir :

$$-q + 2r - s = 0 \text{ ou } q - 2r + s = 0.$$

Ainsi $\{210\}$ est un isocéloèdre.

Formes directes. Formes inverses. — Remarquons maintenant que, dans les isocéloèdres, les faces adjacentes de la pyramide font entre elles le même angle dièdre, aussi bien sur les plans Ox que sur les plans $O\bar{x}'$. Au contraire, dans un scalénoèdre, tel que celui de la figure 173, deux faces adjacentes sur Ox, comme (qrs) et (srq), font entre elles un angle sensiblement plus ouvert que deux faces (qrs), (qsr), adjacentes suivant $O\bar{z}$. Les formes pour lesquelles les angles dièdres les plus ouverts des faces adjacentes ont leurs arêtes dirigées suivant les arêtes Ox, Oy, Oz du rhomboèdre générateur, sont dites *formes directes*, tandis que les autres sont des *formes inverses*. La limite commune des deux catégories étant formée par les isocéloèdres, pour lesquels $q + s = 2r$, les formes directes, dont les pôles sont compris dans le secteur xOx', doivent avoir $q + s > 2r$. En effet, si le pôle tombait sur Ox, les deux faces se confondraient en une seule et le symbole deviendrait (qss).

(1) Pour distinguer cette forme d'autres qui sont également limitées par des triangles scalènes, on l'appelle quelquefois *scalénoèdre ditrigonal*.

Comme on a $q > s$ dans le secteur $xO\bar{z}$, il en résulterait $q + s > 2s$ ou, ce qui revient au même, puisque $s = r$, $q + s > 2r$. Au contraire, sur $O\bar{z}$, la forme serait (rrs) et, avec $r > s$ on aurait $r + s < 2r$ ou $q + s < 2r$.

Formes parallèles. — 1° *A l'axe ternaire* :

Cet axe étant d'ordre impair, les formes de cette nature continuent à être à douze faces. Leurs pôles doivent d'ailleurs se trouver sur le cercle fondamental. La face déterminante est normale au plan de ce cercle et intercepte, sur les trois axes, des longueurs qui, vu l'égale inclinaison de ces axes sur le plan fondamental, sont rigoureusement proportionnelles à leurs projections OQ, OR, OS (fig. 176). D'ailleurs, comme la projection de l'axe Oz est la résultante du parallélogramme construit sur les deux autres, on a $q + r = s$. La notation de la forme doit donc être

$$\{ qr\overline{q+r} \}.$$

La face $(qr\overline{q+r})$ se répète deux fois autour de l'axe ternaire, trois fois autour des axes binaires, ce qui donne six positions, dont le nombre est doublé par l'intervention du centre et des plans de symétrie. Il en résulte un prisme indéfini, dont la section droite est un dodécagone non régulier, semblable à celui que donnerait le système sénaire. C'est le *prisme dodécagonal*.

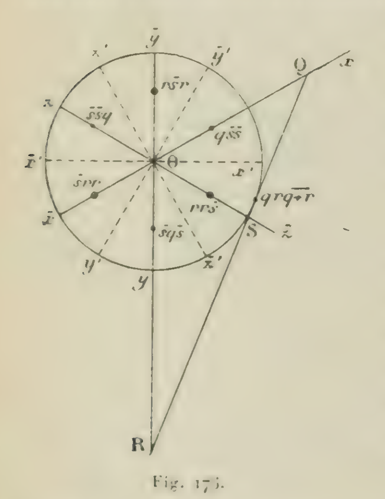


Fig. 176.

2° *Aux axes binaires*.

Les pôles sont dans les plans de symétrie et les traces des faces tangentes à la sphère en ces pôles viennent dessiner sur le plan fondamental un hexagone régulier. Il y a trois pôles en haut, dans les secteurs de 60 degrés groupés autour des parties positives des axes, et trois pôles en bas, dans les secteurs négatifs. Il en résulte une double pyramide trièdre, raccordée suivant un hexagone en zigzag et, la figure étant parfaitement symétrique, il est évident que chaque face, qui en rencontre quatre autres, a la forme d'un losange. Le polyèdre, qui d'ailleurs est un parallélépipède, puisque ses faces sont deux à deux parallèles, est donc un *rhomboèdre*.

Il suffit de se reporter à la figure 168 pour voir que, dans ce rhomboèdre, les trois axes binaires, parallèles aux diagonales horizontales des losanges, sont aussi les perpendiculaires abaissées du centre sur les milieux des côtés de l'hexagone en zigzag, hexagone dont les arêtes sont d'ailleurs, deux par deux, parallèles aux arêtes culminantes du rhomboèdre. Deux faces culminantes se rencontrent sur un plan de symétrie, qui est normal à la troisième et contient l'axe ternaire. Les diagonales culminantes des losanges sont donc les traces, sur les plans des faces, des plans de symétrie.

Parmi tous les rhomboèdres d'une même espèce, on en choisit un, plus fréquent ou mieux marqué que les autres, indiqué, par exemple, par trois directions de clivages identiques, et on en fait le *rhomboèdre primitif* ou *générateur*, servant à fixer la position des trois arêtes conjuguées Ox, Oy, Oz.

Cela posé, il y a deux séries de rhomboèdres : les rhomboèdres *directs* ($qs\bar{s}$), dont les pôles sont situés sur Ox, Oy, Oz, et les rhomboèdres inverses ($rr\bar{s}$), dont les pôles se projettent sur les parties négatives des mêmes lignes.

Lorsque les pôles arrivent sur le cercle fondamental, la forme se change en un prisme hexagonal, dont la notation devient ($11\bar{2}$) ; car alors les longueurs interceptées obéissent dans leurs relations à la formule du parallélogramme. C'est le *prisme de première espèce*, ses côtés étant parallèles aux axes binaires (1).

Formes normales. 1° *A l'axe ternaire* :

La forme se réduit à une couple de faces, ou *bases*, de notation (111) ; car tout plan parallèle au plan fondamental intercepte sur les trois arêtes des longueurs égales.

2° *Aux axes binaires* :

La forme est évidemment un prisme hexagonal, dont la face déterminante, parallèle par exemple au plan $y\bar{y}$, intercepte sur les trois axes des longueurs respectivement égales à $\frac{1}{q}, \frac{1}{0}, \frac{1}{q}$, de telle sorte que sa notation est $(qo\bar{q})$ ou $(10\bar{1})$. C'est le *prisme hexagonal de seconde espèce*.

§ 2

FORMES COMPOSÉES. NOTATION DE LÉVY PERSPECTIVE STÉRÉOGRAPHIQUE

Rhomboèdre primitif. — Dans le système de Lévy, toutes les formes obéissant à la symétrie ternaire sont considérées comme des dérivations, obtenues, par voie de troncature, sur les angles ou les arêtes d'un rhomboèdre dit *primitif*. Ce rhomboèdre, pour lequel on choisit, comme nous l'avons dit, la forme rhomboédrique le plus fréquente ou celle que définissent les trois clivages identiques, quand ils existent, est aussi celui qui détermine le noyau ou parallélépipède générateur de l'assemblage.

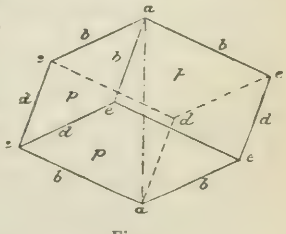


Fig. 177.

Considérons ce rhomboèdre primitif (fig. 177). Toutes ses faces sont identiques, les trois faces qui aboutissent à une extrémité a de l'axe ternaire dérivant les unes des autres par rotation de 120 degrés autour de cet axe,

(1) Quelques auteurs font de ce prisme le prisme de deuxième espèce, réservant le titre de première espèce au prisme qui est normal aux axes binaires.

tandis que chacune d'elles engendre une des faces aboutissant à l'autre extrémité par rotation autour d'un axe binaire. Elles doivent donc porter la notation p. Les deux pointements ternaires forment les angles a. Quant aux sommets de l'hexagone en zigzag, ils n'ont pas la même valeur que les précédents, auxquels ils ne peuvent être substitués, et ils peuvent seulement se remplacer les uns les autres par rotation autour des axes binaires. Ce sont des angles e. Les arêtes culminantes, soit du haut, soit du bas, sont identiques et portent la notation b. Quant aux arêtes de l'hexagone en zigzag, bien qu'elles aient, comme rangées, le même paramètre que les précédentes, auxquelles elles sont parallèles, elles ne peuvent leur être substituées et doivent porter la notation d.

Le rhomboèdre primitif porte la notation p, qui correspond évidemment à {100}. On le définit complètement par la valeur de l'angle dièdre que forment entre elles, sur une arête culminante b, deux faces p adjacentes.

Perspective stéréographique du rhomboèdre. Angles et rapport d'axes. — L'angle pp de deux faces rhomboédriques culminantes étant donné, appelons-le α. Les deux pôles adjacents du rhomboèdre primitif doivent être séparés l'un de l'autre par un arc de grand cercle égal à $(\pi - \alpha)$. Ces deux pôles sont d'ailleurs situés sur les parties positives de deux plans de symétrie, tels que Ox et Oy (fig. 178) et, par suite, l'arc de grand cercle qui les réunit doit passer par les extrémités x' et $\bar{x}'$ de l'un des axes binaires. Le problème à résoudre est donc celui-ci : Mener par x' et $\bar{x}'$ un arc de cercle tel que la portion interceptée entre les traces des deux plans de symétrie soit égale à $(\pi - \alpha)$. Le reste du demi-cercle est alors $\pi - (\pi - \alpha)$ ou α. Par conséquent l'arc intercepté entre un pôle p et l'extrémité $\bar{x}'$ par exemple, est égal à $\frac{\alpha}{2}$. Le pôle p doit, en résumé, se trouver à l'intersection de la trace py avec un petit cercle décrit de $\bar{x}'$ comme centre, l'ouverture angulaire étant $\frac{\alpha}{2}$. Il est facile de déterminer deux points de ce petit cercle sur le cercle fondamental, à égale distance de $\bar{x}'$. En relevant l'un d'eux, on l'amène, sur le cercle projeté en $x'\bar{x}'$, en un point dont il est aisé de trouver la perspective. On n'a plus qu'à tracer, par les trois points obtenus, un cercle, dont l'intersection avec la trace y donnera le pôle p cherché. On en déduira les autres pôles p et, en les réunissant deux à deux par des arcs de grands cercles, on formera un triangle sphérique équilatéral ppp, définissant entièrement la forme rhomboédrique et, avec elle, tout l'ensemble du système. Les trois sommets p correspondent respectivement à (100), (010) et (001).

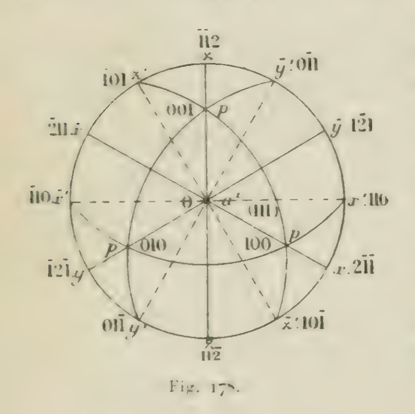


Fig. 178.

Si l'on appelle α l'angle dièdre de deux faces culminantes p, angle qui suffit absolument à définir le rhomboèdre, on s'assure sans peine que l'angle plan x de deux arêtes b est donné par la formule :

$$\cos\frac{1}{2}x = \frac{\cos\frac{1}{2}\alpha}{\sin\alpha} = \frac{1}{2\sin\frac{1}{2}\alpha}.$$

Par exemple, pour $\alpha = 100^\circ\,5'$, on trouve $x = 101^\circ\,55'$.

Quant au paramètre h de l'axe ternaire (celui que nous désignons d'ordinaire par c), si l'on prend pour unité le paramètre des axes binaires, il se déduit du même angle α par la formule :

$$\frac{3}{2}\cdot\frac{1}{h^2} = \frac{1 - 2\cos\alpha}{1 + \cos\alpha},$$

d'où

$$h^2 = \frac{3}{2}\,\frac{1 + \cos\alpha}{1 - 2\cos\alpha}.$$

On en retire, inversement

$$\cos\alpha = \frac{2h^2 - 3}{3 + 4h^2}.$$

Modifications sur les angles culminants. — Toute modification de ce genre, devant remplacer l'angle a par un pointement plus surbaissé, est comprise entre deux limites extrêmes : 1° les faces p elles-mêmes ; 2° la face de base, également inclinée sur les trois arêtes, et, par conséquent, *tangente* à l'angle a. Cette dernière a son pôle en O. Dès lors, tous les pôles des facettes modifiant les angles a devront se trouver compris dans l'intérieur du triangle fondamental et, chaque face coupant les trois arêtes dans l'intérieur de l'angle trièdre, du même côté du sommet, les trois caractéristiques doivent être de même signe, étant toutes trois positives s'il s'agit de l'hémisphère supérieur.

La modification la plus générale est celle qu'on obtient à l'aide d'une facette qui intercepte à partir de a, sur les trois arêtes b concourantes, trois longueurs

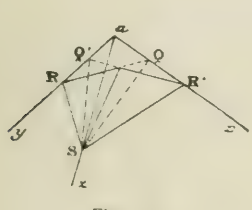


Fig. 179.

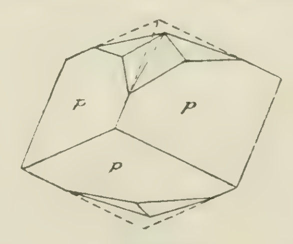


Fig. 180.

inégales, proportionnelles à $\frac{1}{q}, \frac{1}{r}, \frac{1}{s}$. Soit $q > r > s$. En portant $\frac{1}{s}$, qui est la plus grande des trois longueurs, sur l'arête z (fig. 179), le point obtenu est l'origine de deux facettes interceptant, l'une $\frac{1}{q}$ sur x et $\frac{1}{r}$ sur y, l'autre $\frac{1}{r}$ sur

x et $\frac{1}{q}$ sur y. Mais ce qu'on a fait pour z doit se répéter pour x et pour y. Il en résulte trois couples de facettes (fig. 177), conduisant à un scalénoèdre de notation

$$b^{\frac{1}{s}} \quad b^{\frac{1}{r}} \quad b^{\frac{1}{q}}.$$

Ce scalénoèdre correspond à la formule $\{qrs\}$. La forme sera directe si les pôles tombent dans un angle tel que $x'O\bar{z}'$ (fig. 175), c'est-à-dire dans l'angle formé par deux axes binaires adjacents à un plan de symétrie Opx. On aura alors $q + s > 2r$.

A cette catégorie appartiennent

$$\{421\} = \{b^1 b^{\frac{1}{2}} b^{\frac{1}{4}}\}, \quad \{521\} = \{b^1 b^{\frac{1}{2}} b^{\frac{1}{5}}\}, \quad \{10.4.1\} = b^1 b^{\frac{1}{4}} b^{\frac{1}{10}}\}, \text{ etc.}$$

Si, au contraire, les pôles tombent entre Oy' et $O\bar{z}'$, la forme sera inverse, avec $q - s < 2r$, comme pour $\{431\} = \{b^1 b^{\frac{1}{3}} b^{\frac{1}{4}}\}$ et pour $\{542\} = \{b^{\frac{1}{2}} b^{\frac{1}{4}} b^{\frac{1}{5}}\}$.

Si les pôles viennent tomber sur les axes binaires, mais toujours à l'intérieur du triangle ppp, nous savons que la forme doit être un isocéloèdre et que $q + s = 2r$. A cette condition satisfont $\{321\}$, $\{432\}$, $\{741\}$, etc.

Si les pôles tombent sur les plans de symétrie (ou lignes médianes du triangle ppp), deux cas peuvent se présenter :

1° Les pôles tombent entre le sommet O et un sommet p. La forme correspondante, de notation $\{qss\}$, avec $q > s$, est une troncature interceptant, sur une arête, une longueur $\frac{1}{q}$, et, sur les deux autres, deux longueurs égales $\frac{1}{s}$, plus grandes que $\frac{1}{q}$. Il n'existe, sur chaque sommet a, que trois facettes semblables, et l'ensemble (fig. 181) conduit à un rhomboèdre, plus surbaissé que p, mais ayant ses arêtes dirigées comme celles du primitif p, et par conséquent direct. Sa notation, qui devrait être $b^{\frac{1}{q}} b^{\frac{1}{s}} b^{\frac{1}{s}}$, s'écrit, par abréviation, $a^{\frac{q}{s}}$, l'exposant $\frac{q}{s}$ étant toujours plus grand que l'unité.

Parmi les rhomboèdres directs, les plus fréquents sont :

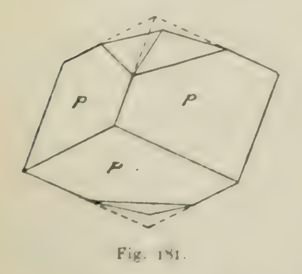


Fig. 181.

$$\{211\} = a^2,$$
$$\{311\} = a^3,$$
$$\{322\} = a^{\frac{3}{2}},$$
$$\{411\} = a^4, \text{ etc.}$$

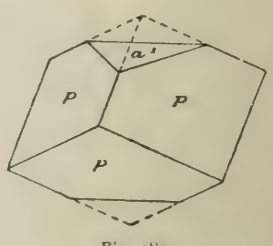


Fig. 182.

Lorsque s augmente de façon à se rapprocher de la valeur de q, les trois faces du rhomboèdre tendent à se confondre en une seule. A la limite (fig. 182),

on obtient les deux *bases* (111) et $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$, de notation a^1, et dont le pôle se confond avec le centre du cercle fondamental. L'autre limite est justement le rhomboèdre p, pour lequel $\frac{1}{s}$ devient infini et qui, par conséquent correspond au symbole a^∞.

2° Les pôles tombent sur le prolongement de Op, c'est-à-dire entre O et le milieu du côté pp opposé à Op. Dans ce cas, le symbole du rhomboèdre est $\{rrs\}$ avec $r > s$. De chaque arête culminante, à la distance $\frac{1}{s}$ du sommet, part une facette placée symétriquement sur cette arête et interceptant, sur les deux autres, deux longueurs égales à $\frac{1}{r}$ (fig. 183). Le rhomboèdre, toujours plus surbaissé que le primitif (fig. 184), est inverse et a pour notation $a^{\frac{s}{r}}$, l'exposant $\frac{s}{r}$ étant toujours plus petit que 1. A cette catégorie appartiennent $(221) = a^{\frac{1}{2}}$, $\{332\} = a^{\frac{2}{3}}$, etc. La plus petite valeur de l'exposant correspond au cas où $s = 0$. Alors le rhomboèdre devient tangent à l'arête b, combinaison que nous allons examiner dans un instant.

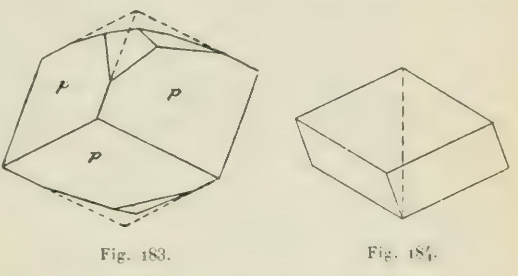


Fig. 183. Fig. 184.

Modifications sur les arêtes culminantes. — Toute modification sur une arête b est parallèle à cette arête, c'est-à-dire à l'intersection mutuelle des faces adjacentes du rhomboèdre p. Elle fait donc partie de la zone déterminée par ces deux faces adjacentes, c'est-à-dire que son pôle doit tomber sur le triangle fondamental, entre deux pôles p. De plus, la face déterminante ne rencontrant que deux arêtes, son symbole est $\{qro\}$, ce qui se traduit par

$$b^{\frac{1}{0}} \quad b^{\frac{1}{r}} \quad b^{\frac{1}{r}} \quad \text{ou} \quad b^{\frac{q}{r}}.$$

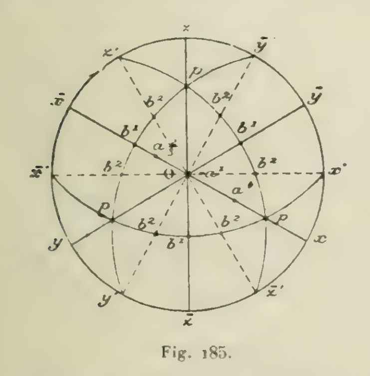


Fig. 185.

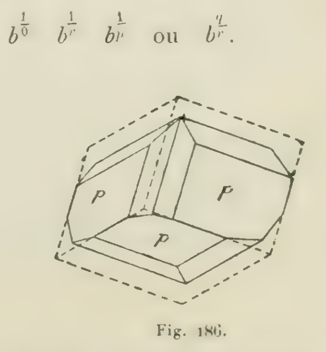


Fig. 186.

Cela posé, sur les parties des côtés du triangle (fig. 185) comprises entre un pôle p et les deux axes binaires les plus voisins Ox', $O\bar{z}'$, la forme, qui ne peut

être qu'un scalénoèdre (fig. 186), est directe et l'on a $q > 2r$. Ainsi $\{310\} = b^3$, $\{510\} = b^5$, $\{520\} = b^{\frac{5}{2}}$.

Au contraire la partie comprise entre $O\bar{z}'$ et Oy' donne lieu à des scalénoèdres inverses, pour lesquels on a $q < 2r$, par exemple

$$\{320\} = b^{\frac{3}{2}}, \ \{530\} = b^{\frac{5}{3}}.$$

La limite commune des deux séries est formée par les pôles situés sur $\overline{O}z'$, Oy', lesquels correspondent à un isocéloèdre. Évidemment, pour ce dernier, on a $q = 2r$ et, par suite, la notation est b^2 ou (210).

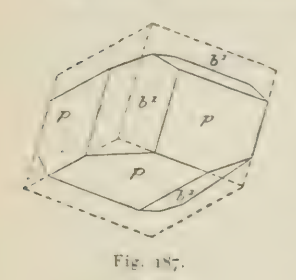


Fig. 187.

La limite extrême des scalénoèdres directs étant p, pour lequel le symbole serait b^∞, celle des scalénoèdres inverses correspond au cas où le pôle tombe sur le plan de symétrie $O\bar{z}$, auquel cas on a évidemment un rhomboèdre dit *inverse du primitif* et correspondant à $q = r$, de sorte que son symbole est (110) ou b^1 (fig. 187).

Modifications sur les angles latéraux. — De telles modifications sont nécessairement plus aiguës que le rhomboèdre primitif. Dès lors leurs pôles, pour l'hémisphère supérieur, doivent se projeter en dehors du triangle fondamental, par exemple dans l'espace $py'\bar{z}pb^1p$. Dans ce cas, puisqu'il faudrait que le pôle fût situé en b^1 pour que la face correspondante fût parallèle à l'arête projetée en Oz, cette arête ne sera rencontrée que dans sa partie négative et, par suite, une des trois caractéristiques, pour les pôles de l'hémisphère supérieur, sera affectée du signe —.

La modification la plus générale résulte de deux facettes, interceptant, sur l'arête culminante b, la même longueur $\frac{1}{s}$ et, sur les deux arêtes d, les longueurs $\frac{1}{q}$ et $\frac{1}{r}$ (fig. 188). Il en résulte un scalénoèdre :

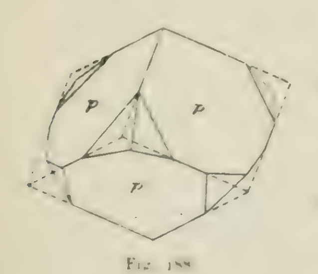


Fig. 188

$$\{qr\bar{s}\} = \{b^{\frac{1}{s}} d^{\frac{1}{r}} d^{\frac{1}{q}}\},$$

direct quand $q - s > 2r$, comme

$$\{51\bar{2}\} = \{b^{\frac{1}{2}} d^1 d^{\frac{1}{5}}\} \text{ et } \{82\bar{1}\} = \{b^1 d^{\frac{1}{2}} d^{\frac{1}{8}}\},$$

et inverse quand $q - s < 2r$, comme pour

$$\{32\bar{1}\} = \{b^1 d^{\frac{1}{2}} d^{\frac{1}{3}}\}.$$

Les scalénoèdres directs de cette série ont leurs pôles dans les triangles $b^2p\bar{z}'$, b^2py', tandis que les pôles des scalénoèdres inverses tombent dans l'espace $y'b^2b^1b^2\bar{z}$.

Lorsque $q - s = 2r$, la forme est un isocéloèdre, dont le pôle tombe sur $O\bar{z}'$, entre b^2 et $\bar{z}'$.

Lorsque s devient égal à r en valeur absolue, le scalénoèdre résultant $\{qr\bar{r}\}$, direct quand $q - r > 2r$, ou $q > 3r$, ou $\frac{q}{r} > 3$, prend la notation abrégée $e_{\frac{q}{r}}$. De ce nombre est $e_4 = \{41\bar{1}\}$. Parmi les scalénoèdres inverses figurent $e_2 = \{21\bar{1}\}$, $e_{\frac{2}{3}} = \{32\bar{2}\}$, etc. Quant à la forme e_3, qui correspond à $q = 3r$ ou $q - r = 2r$, c'est un isocéloèdre $(31\bar{1})$, situé sur $O\bar{z}'$.

Le lieu des pôles $\{qr\bar{r}\} = e_{\frac{q}{r}}$ ou $\{qr\bar{q}\} = e_{\frac{r}{q}}$ est facile à trouver ; en effet, une face déterminante de $\{qr\bar{r}\}$, interceptant (fig. 189) deux longueurs égales, EC sur l'arête $EA = b$ et ED, ED′ sur les arêtes EE′ et $EE'' = d$, est nécessairement parallèle à la diagonale AE′ du rhombe AEE′, laquelle n'est autre que l'intersection d'une face p avec le plan de symétrie

Fig. 189.

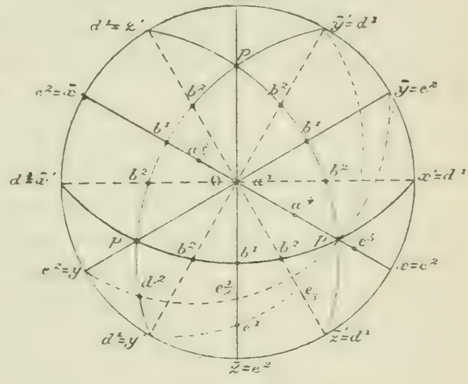


Fig. 190.

opposé, qui passe par AE‴A′. Donc, toutes les faces homologues des divers scalénoèdres que nous cherchons forment zone entre elles et leurs pôles doivent se trouver sur un même cercle. Ce cercle étant d'ailleurs le cercle de zone d'une face p et du plan de symétrie opposé, doit passer par le pôle p et par le point y', pôle du plan $x\bar{x}$, qui est le plan de symétrie normal à la face p. Ainsi c'est sur le cercle pointillé $y'p\bar{y}'$ que se trouvent tous les pôles cherchés et e_3 est à l'intersection de ce cercle avec $O\bar{z}'$ (fig. 190).

Les scalénoèdres directs $\{qr\bar{r}\}$ ont pour limites, d'un côté e_3, de l'autre $p = e^{\infty}$, tandis que les inverses vont de e_3 au pôle y', qui correspondrait à e_0.

Quand les pôles tombent sur le cercle fondamental, la forme, de symbole $\{qr(\overline{q+r})\}$ est un prisme dodécagonal (fig. 191), de notation :

$$\{ b^{\frac{1}{q+r}} d^{\frac{1}{r}} d^{\frac{1}{q}} \}.$$

Ainsi $\{21\bar{3}\} = \{ b^{\frac{1}{3}} d^1 d^{\frac{1}{2}} \}$.

Si les pôles sont situés sur le plan de symétrie $O\bar{z}$, il n'y a, sur chaque angle e, qu'une seule facette, interceptant $\frac{1}{s}$ sur la partie négative de l'arête b et $\frac{1}{r}$ sur

chacune des deux arêtes d (fig. 192). La forme $\{rr\bar{s}\}$, parallèle à la diagonale horizontale des faces p, est un rhomboèdre inverse aigu (fig. 193), dont la notation devient $e^{\bar{r}}$.

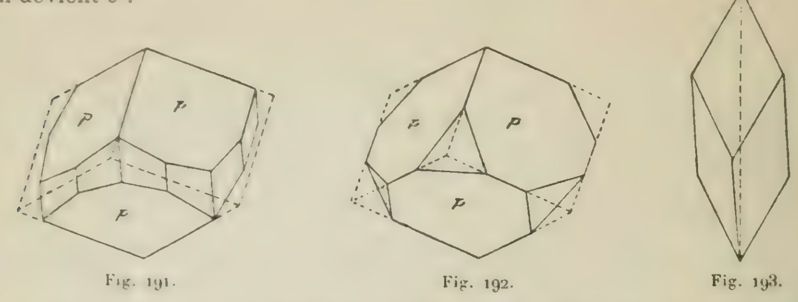


Fig. 191. Fig. 192. Fig. 193.

La plus petite valeur de s est zéro, auquel cas le rhomboèdre, tangent à l'arête b, se confond avec b^1, qui correspond ainsi à e^0. Au delà, l'exposant de e va en croissant jusqu'à sa limite extrême, qu'il atteint quand le pôle coïncide avec $\bar{z}$. A ce moment, la forme est le prisme hexagonal de première espèce, parallèle aux axes binaires. Sa notation est ($rr\overline{2r}$ ou ($11\bar{2}$)), puisque la longueur interceptée sur l'arête O$\bar{z}$ peut alors être représentée par sa projection, laquelle est liée aux deux autres par la relation ordinaire du parallélogramme, $q + r = s$.

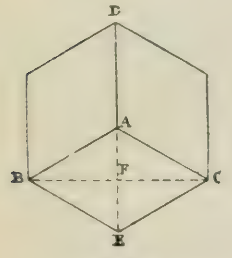


Fig. 194.

Mais on peut aussi le voir directement avec une grande facilité, en projetant normalement le rhomboèdre sur le plan des axes binaires (fig. 194). En effet, une troncature parallèle en même temps aux axes binaires et à l'axe ternaire pourra être définie par une trace telle que BC, laquelle, étant la diagonale du rhombe de projection ABCE, intercepte en bas, sur les arêtes AB et AC, deux longueurs se projetant en AB et en AC et, en haut, sur le prolongement AE de la troisième AD, une longueur projetée en $AF = \frac{1}{2} AE = \frac{1}{2} AD$. Ainsi le rapport des longueurs interceptées, qui est le même que celui de leurs projections, comme nous l'avons déjà dit, est de 1 à $\frac{1}{2}$. Donc la notation du prisme est e^2. Par suite, pour tous les rhomboèdres directs installés sur les angles e, on doit avoir $\frac{s}{r} < 2$ ou $s < 2r$.

Le prisme e^2 étant parallèle aux axes binaires, comme le sont les faces du rhomboèdre, l'intersection de chaque face p avec la face e^2 qui a son pôle sur le même rayon doit être horizontale, comme l'est la diagonale du rhombe qui définit l'axe binaire. La combinaison de p avec e^2 a donc la forme représentée dans la figure 195.

Quant au rhomboèdre e^1 ou ($11\bar{1}$), il est clair que sa face déterminante est formée par la réunion des diagonales culminantes de deux faces p adjacentes

sur l'arête b. Donc son pôle doit se trouver sur le cercle pe_3y', à son intersection avec $O\bar{z}$ (fig. 196).

Mais il y a encore d'autres modifications sur les angles e. Ce sont celles dont les pôles se projettent dans les triangles tels que $px'\bar{z}'$. Dans ce cas, il est visible qu'une seule des caractéristiques est positive.

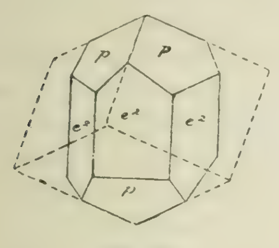


Fig. 195.

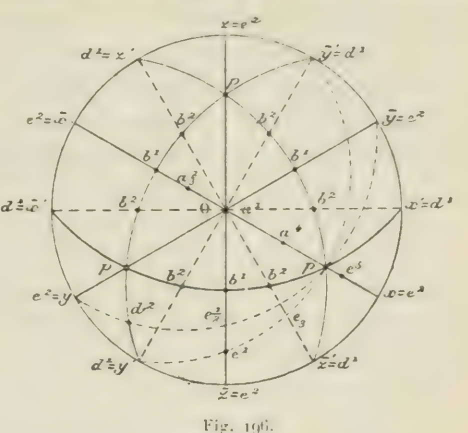


Fig. 196.

A cette série, qui ne comprend que des formes directes, puisque tous les pôles sont dans le secteur $x'o\bar{z}'$, appartiennent les scalénoèdres $\{q\bar{r}\bar{s}\}$ ou $b^{\frac{1}{q}}d^{\frac{1}{r}}d^{\frac{1}{s}}$, qui ne diffèrent pas, comme position générale, de ceux de la série précédente, mais ne comportent pas de formes isocéloédriques.

La même série comprend les rhomboèdres directs $\{q\bar{s}\bar{s}\}$ ou $e^{\frac{q}{s}}$, dont les pôles sont situés entre p et x, comme $e^5 = \{5\bar{1}\bar{1}\}$, les symboles ayant e^2 pour limite inférieure et $p = e^\infty$ pour limite supérieure.

Modifications sur les arêtes latérales. — Il nous reste à examiner les modifications sur les arêtes latérales d.

La plus générale se compose de deux facettes, l'une et l'autre parallèles à une arête d, et dont l'une intercepte (fig. 197) $EC = \frac{1}{q}$ sur l'arête $b = AE$ et $ED = \frac{1}{s}$ sur l'arête $d = EE'''$

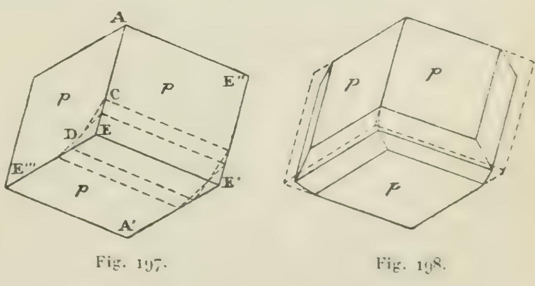


Fig. 197. Fig. 198.

ou, ce qui revient au même, sur l'arête inférieure $b = A'E'$. Alors il faut que l'autre facette intercepte $\frac{1}{s}$ sur EA et $\frac{1}{q}$ sur E'A'. Le biseau résultant (fig. 198) donne lieu à un scalénoèdre

$$d^{\frac{1}{v}} \quad b^{\frac{1}{q}} \quad b^{\frac{1}{s}} = \{qo\bar{s}\},$$

car les deux arêtes coupées le sont l'une dans sa partie positive, et l'autre dans sa partie négative. Les scalénoèdres de cette série sont tous parallèles aux arêtes de l'hexagone en zigzag du rhomboèdre primitif, c'est-à-dire à l'intersection de deux faces p non issues d'un même sommet ternaire. Mais les arêtes de cet hexagone sont, nous le savons, situées dans des plans verticaux parallèles aux plans de symétrie. Donc, les scalénoèdres en question forment zone avec une face p et le plan de symétrie non perpendiculaire à cette face, par exemple Oy ou Oz. Donc leurs pôles sont sur les cercles passant par p et les pôles x' et z' des plans Oz et Oy, dans les parties px' et pz'. Ainsi se trouvent enfin employés les prolongements des côtés du triangle fondamental.

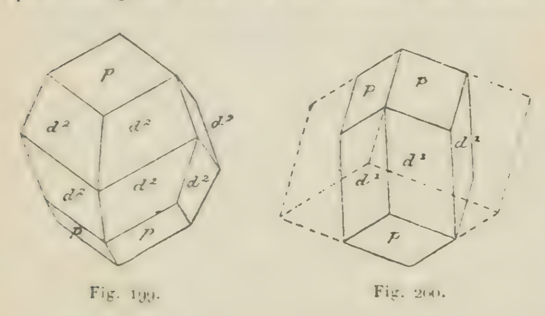


Fig. 199. Fig. 200.

Ces scalénoèdres, parallèles aux arêtes de l'hexagone en zigzag, ont reçu d'Haüy, au moins pour ce qui concerne la chaux carbonatée ou calcite, le nom de scalénoèdres *métastatiques*. On les reconnaît aisément, quand le clivage a fait naître sur leurs sommets aigus des troncatures, dont les arêtes d'intersection avec les faces scalénoédriques sont exactement parallèles à celles de l'hexagone en zigzag (fig. 199).

Pour simplifier, on donne à ces scalénoèdres la notation $d^{\frac{q}{s}}$. Ainsi $\{20\bar{1}\} = d^2$.

Les limites des symboles sont comprises entre $p = d^{\infty}$ et $\bar{z}'$, pour lequel le scalénoèdre se transformant en un prisme, le prisme de deuxième espèce, les deux faces adjacentes suivant d se confondent en une seule, auquel cas $q = s$ et le symbole devient $d^1 = \{10\bar{1}\}$.

Combiné avec p (fig. 200), ce prisme présente des faces en forme de parallélogrammes.

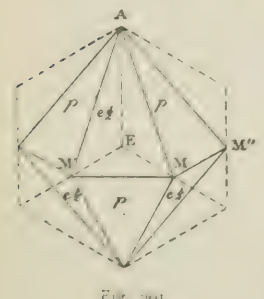


Fig. 201

Formes birhomboédriques. — Si l'on joint (fig. 201) un sommet ternaire A du rhomboèdre aux milieux M et M' de deux arêtes d consécutives, on obtient une face triangulaire isocèle AMM', appartenant à un rhomboèdre inverse, de notation $e^{\frac{r}{s}}$ avec la condition $\frac{1}{s} = 2 \times \frac{1}{r}$ ou $r = 2s$, puisque

$$\text{EM} = \text{EM}' = \frac{1}{2}\,\text{EA}.$$ C'est donc $e^{\frac{1}{2}}$.

Or les faces AMM' de ce rhomboèdre, combinées avec les portions restantes AMM' des faces p, engendrent une pyramide hexagonale isocéloédrique, ayant pour base un hexagone régulier, dont les côtés

sont parallèles aux diagonales horizontales des rhombes, c'est-à-dire aux axes binaires. Les formes p et $e^{\frac{1}{2}}$, dont la réunion donne ainsi une pyramide régulière, sont dites *birhomboédriques*. La forme qui résulte de leur association est un *birhomboèdre*, et si ses faces paraissent géométriquement égales, au point de donner lieu à un pseudo-isocéloèdre, on s'aperçoit, en général, de leur différence intrinsèque, soit parce que les trois faces de p dominent, sur un pointement, relativement aux trois faces de $e^{\frac{1}{2}}$, soit parce que la série des faces p possède des propriétés physiques différentes de celles des faces $e^{\frac{1}{2}}$.

D'ailleurs la ligne AM, intersection mutuelle d'une face p et d'une face $e^{\frac{1}{2}}$, est contenue dans le plan qui passe par l'axe ternaire et par l'axe binaire aboutissant en M. On peut donc la regarder comme l'intersection de la face p avec le plan mené par l'axe ternaire et l'une des deux traces Ox', $O\bar{z}'$, les plus voisines de p. Donc il est permis de dire que la face $e^{\frac{1}{2}} = AMM'$, qui contient cette ligne AM, fait partie de la zone comprenant la face p et le plan $O\bar{z}'$. Donc le cercle passant par p et par le point $e^2 = \bar{y}$, pôle de $O\bar{z}'$, coupera en $e^{\frac{1}{2}}$ la trace $O\bar{z}$ (fig. 196). C'est ce même cercle $pe^{\frac{1}{2}}$ adjacent qui vient couper en d^2 le lieu py' des scalénoèdres métastatiques.

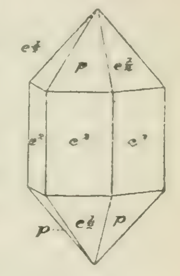


Fig. 202.

Les faces birhomboédriques, tangentes à la même sphère et devant couper l'axe ternaire au même point, doivent avoir leurs pôles à la même hauteur au-dessus du plan des axes binaires. Par conséquent, sur une perspective stéréographique, les points p et $e^{\frac{1}{2}}$ se trouvent sur un même cercle, décrit de O comme centre. De plus, les faces p et $e^{\frac{1}{2}}$ étant parallèles aux axes binaires, lesquels sont tous contenus en direction dans les faces du prisme e^2, la combinaison $pe^2e^{\frac{1}{2}}$ donne un prisme hexagonal, coiffé par deux pyramides régulières et dit *prisme bipyramidé* (fig. 202).

Isocéloèdres. Faces rhombes. — Remarquons maintenant que les faces adjacentes d'une forme birhomboédrique, ayant leurs pôles sur deux plans de symétrie consécutifs, ne peuvent venir se couper que sur les plans bissecteurs des angles de ces derniers. Leurs intersections mutuelles sont donc situées sur les plans passant par l'axe ternaire et les axes binaires, lesquels plans contiennent les pôles des isocéloèdres. Ainsi tout isocéloèdre est symétriquement placé sur l'intersection de deux faces birhomboédriques adjacentes, de telle sorte que, sur une combinaison de p, $e^{\frac{1}{2}}$ et e^2, il dessinerait un quadrilatère symétrique.

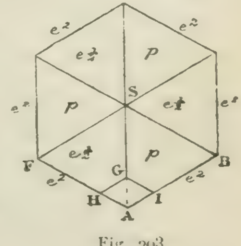


Fig. 203.

Supposons qu'un isocéloèdre symétrique sur l'arête projetée en A (fig. 203) soit en outre astreint à faire partie de la zone qui comprend la face SAB de p et la face, projetée en AF, du prisme e^2. L'intersection de SAB avec la face

verticale AF est parallèle à celle de SAB avec le plan vertical, parallèle à AF, et qui passe par l'arête SB ; en d'autres termes, la zone formée de SAB et de AF a SB pour axe. L'isocéloèdre satisfaisant à cette condition coupera donc SAB suivant GI parallèle à SB et la face AF suivant AH parallèle à GI. Le quadrilatère AAGI sera donc un parallélogramme à côtés égaux, c'est-à-dire un rhombe. Aussi la face de cette forme, quand elle se rencontre à l'état de troncature sur l'ensemble p, $e^{\frac{1}{2}}$, e^2, porte-t-elle le nom de *face rhombe*.

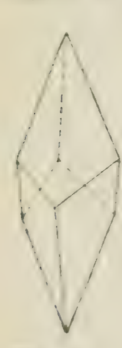
§ 3

FORMES MÉRIÉDRIQUES

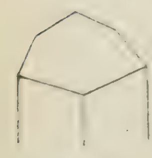
Polyèdres holoaxes hémisymétriques. — Le symbole est

$$A^3, 3L^2.$$

Des six pôles supérieurs de la forme oblique, trois seulement, directement semblables entre eux, sont conservés, par exemple *qrs*, *rsq*, *sqr*. De même, trois pôles sont conservés en bas, dont chacun est symétrique de l'un des précédents relativement à un axe binaire. Il en résulte deux pyramides trièdres, qui ne se raccordent pas suivant le plan des axes binaires, mais suivant un hexagone en zigzag. Ces pyramides trièdres constituent, par leur ensemble, la moitié, directe ou inverse, d'un scalénoèdre. Et comme, dans ce polyèdre, deux faces culminantes, l'une du haut, l'autre du bas, adjacentes suivant une arête de l'hexagone en zigzag, sont directement semblables, elles doivent être conservées ou supprimées ensemble. De là deux solides conjugués, non superposables et dont chacun conserve, en direction, trois des arêtes de l'hexagone en zigzag du scalénoèdre. Mais les arêtes culminantes du haut, égales à celles du bas, ne rencontrent pas ces dernières.


Fig. 204.

Le polyèdre résultant, dit *trapézoèdre trigonal* (fig. 204), se projetterait, sur un plan normal à l'axe ternaire, suivant un hexagone non régulier, les axes binaires continuant à être perpendiculaires sur les milieux de l'hexagone.


Fig. 205.

Quand la forme oblique est un isocéloèdre, ce solide se transforme en une double pyramide trièdre, dont la base commune est un triangle équilatéral, ayant ses côtés perpendiculaires aux axes binaires.

Dans ce cas particulier, les deux formes conjuguées sont évidemment, et par exception, superposables.

Ce genre d'hémiédrie s'applique aux prismes dodécaèdres, qui se transforment (fig. 205) en prismes *ditrigonaux*, à base d'hexagone irrégulier, les

deux formes conjuguées étant encore superposables. Enfin, bien que le prisme hexagonal de deuxième espèce d^1 soit une forme restreinte, comme la demi-forme directe ne s'y confond pas avec la demi-forme inverse, la suppression de cette dernière entraîne la conversion de la forme en un prisme à base de triangle équilatéral, avec superposition possible des deux solides conjugués.

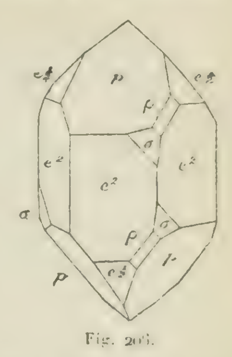


Fig. 206.

Seules, les formes rhomboédriques (y compris le prisme e^2) et les bases a^1 ne sont pas touchées dans ce système. La principale réalisation du mode indiqué a lieu dans le quartz, où l'on observe (fig. 206) la coexistence du prisme de première espèce e^2, du rhomboèdre p, de son inverse birhomboédrique $e_{\frac{1}{2}}$, de l'hémi-isocéloèdre $(41\bar{2}) = b^{\frac{1}{2}}\, d^1\, d^{\frac{1}{4}}$, faisant naître une face rhombe, de l'hémiscalénoèdre $(\bar{4}1\bar{2}) = b^{\frac{1}{4}}\, d^1\, d^{\frac{1}{2}}$ et de plusieurs autres hémiscalénoèdres. Dans cette combinaison, la face rhombe ρ et la face dite *plagièdre* σ, cette dernière appartenant à un hémiscalénoèdre, se rencontrent tantôt, comme dans la figure, *à droite* d'une face p adjacente, tantôt *à gauche*. En tous cas, dans le cristal bipyramidé, comme c'est une face $e_{\frac{1}{2}}$ qui correspond à une face p, en bas d'une même face du prisme e^2, les faces ρ et σ du haut et du bas doivent coexister aux deux extrémités d'une même arête prismatique.

Polyèdres hémiaxes. — 1° *Centrés* :

Le symbole est Λ^3, C.

La forme oblique garde à la partie supérieure trois pôles directement semblables, donnant un pointement ternaire. Ce pointement se répète relativement au centre et il en résulte un parallélépipède, lequel est de plus un rhomboèdre, puisque deux arêtes consécutives de l'un des parallélogrammes culminants sont égales l'une à l'autre. Seulement, dans ce rhomboèdre, les plans diagonaux ne sont plus des plans de symétrie de l'ensemble.

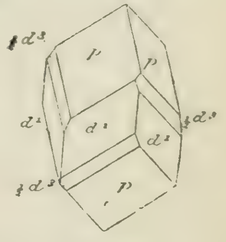


Fig. 207.

Les prismes dodécagonaux se transforment en prismes hexagonaux réguliers, à section non parallèle aux axes binaires. Mais l'hémiédrie ne réagit ni sur les prismes hexagonaux ni sur les rhomboèdres, les uns et les autres trouvant, dans l'existence du centre, le moyen de répéter les trois pôles conservés autour de l'axe ternaire.

La dioptase ou cuivre silicaté offre cette sorte d'hémiédrie, caractérisée par l'association des formes p, d^1 et $\frac{1}{2}\, d^3$ (fig. 207).

2° *Dichosymétriques.*

Le symbole est Λ^3, 3P.

Les six pôles supérieurs du scalénoèdre ou de l'isocéloèdre sont conservés ; mais les six pôles inférieurs manquent, d'où résulte une pyramide non fermée,

Tableau des formes simples du système ternaire ou rhomboédrique.

	SYMBOLES DES FORMES HOLOÉDRIQUES	NATURE DU POLYÈDRE MOLÉCULAIRE				
		HOLOAXE centré	HOLOAXE hémi-symétrique	HÉMIAXE centré	HÉMIAXE dicho-symétrique	HÉMIAXE hémi-symétrique
FORMES OBLIQUES	$\{q\,r\,s\} = b^{\frac{1}{s}}\, b^{\frac{1}{r}}\, b^{\frac{1}{q}}$ $\{q\,r\,o\} = b^{\frac{q}{r}}$ $\{q\,r\,\bar{s}\} = b^{\frac{1}{s}}\, d^{\frac{1}{r}}\, d^{\frac{1}{q}}$ $\{q\,r\,\bar{r}\} = e_{\frac{r}{q}}$ $\{q\,\bar{r}\,\bar{s}\} = b^{\frac{1}{q}}\, d^{\frac{1}{r}}\, d^{\frac{1}{s}}$ $\{q\,o\,\bar{s}\} = d^{\frac{q}{s}}$	Scalénoèdre	Trapézoèdre trigonal	Rhomboèdre non orienté	Hémi-scalénoèdre indéfini	Pyramide triangulaire indéfinie
	$\{q\,r\,(2r-q)\} = b^{\frac{1}{2r-q}}\, b^{\frac{1}{r}}\, b^{\frac{1}{q}}$ $\{q\,r\,\overline{(2r-q)}\} = b^{\frac{1}{2r-q}}\, d^{\frac{1}{r}}\, d^{\frac{1}{q}}$ $\{2\,1\,0\} = b^{2}$ $\{3\,1\,\bar{1}\} = e_{3}$	Isocéloèdre	Double pyramide trièdre	Rhomboèdre non orienté	Pyramide hexagonale indéfinie	Pyramide triangulaire indéfinie
FORMES PARALLÈLES	$\{q\,r\,\overline{q+r}\} = b^{\frac{1}{2q+r}}\, d^{\frac{1}{r}}\, d^{\frac{1}{q}}$	Prisme dodécagonal	Prisme ditrigonal	Prisme hexagonal régulier non orienté	Prisme à base d'hexagone irrégulier	Prisme triangulaire
	$\{1\,1\,\bar{2}\} = e^{2}$	Protoprisme hexagonal	Protoprisme hexagonal	Protoprisme hexagonal	Prisme triangulaire équilatéral orienté	Prisme triangulaire non orienté
	$\{1\,0\,0\} = p$ $\{q\,s\,s\} = a^{\frac{q}{s}}\ (q > s)$ $\{r\,r\,s\} = a^{\frac{s}{r}}\ (r > s)$ $\{1\,1\,0\} = b^{1}$ $\{r\,r\,\bar{s}\} = e^{\frac{s}{r}}\ (s < 2r)$ $\{q\,\bar{s}\,\bar{s}\} = e^{\frac{q}{s}}\ (q < 2s)$	Rhomboèdre primitif direct inverse — — direct	Rhomboèdre	Rhomboèdre	Pyramide triangulaire indéfinie	Pyramide triangulaire indéfinie
FORMES NORMALES	$\{1\,1\,1\} = a^{1}$	Bases	Base	Bases	Une seule base	Une seule base
	$\{1\,0\,\bar{1}\} = d^{1}$	Deutéroprisme hexagonal	Prisme triangulaire équilatéral orienté	Deutéroprisme hexagonal	Deutéroprisme hexagonal	Prisme triangulaire orienté

ou *pyramide ditrigonale*, c'est-à-dire un cas d'*hémimorphisme*. Les prismes dodécagonaux se transforment en prismes hexagonaux non réguliers; les rhomboèdres se réduisent à trois faces culminantes; le prisme e^2 est transformé en prisme triangulaire équilatéral; seul le prisme d^1, normal aux axes binaires, n'éprouve aucune suppression.

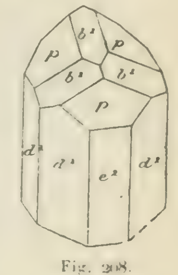


Fig. 208.

La tourmaline (fig. 208) offre ce genre d'hémiédrie, qui se traduit à la fois par la dyssymétrie des pointements opposés, entraînant comme conséquence certaines propriétés physiques spéciales, notamment la pyroélectricité, et par la prédominance des sections prismatiques d'apparence triangulaire, quand le prisme e^2 domine. Le plus souvent, on observe, comme dans la figure 208, la coexistence de d^1 avec $\frac{1}{2}e^2$, l'un des sommets portant le rhomboèdre p, aux arêtes abattues par son inverse b^1, tandis qu'à l'autre extrémité du prisme se trouve, par exemple, le rhomboèdre e^1 seul. De plus, les arêtes des intersections mutuelles des faces d^1 et e^2 sont fréquemment abattues par une facette d'un hémiprisme dodécagonal, ce qui donne aux côtés de la section triangulaire un contour arrondi.

3° *Hémisymétriques.*

Le symbole se réduit à Λ^3.

C'est une tétartoédrie, pouvant être considérée comme la réduction à moitié des formes du cas précédent. Trois pôles seulement sont conservés dans l'un des deux hémisphères et il n'est aucune forme qui échappe aux réductions entraînées par cette diminution de la symétrie.

CHAPITRE V

SYSTÈME TERBINAIRE OU RHOMBIQUE (ORTHORHOMBIQUE)

§ I

NOYAU ET FORMES SIMPLES DU SYSTEME

Noyau de l'assemblage. — Le symbole complet de la symétrie terbinaire est

$$L^2,\ L'^2,\ L''^2,\ C,\ P,\ P',\ P''.$$

Les trois axes binaires étant rectangulaires entre eux, projetons orthogonalement (fig. 209) tout le système sur le plan qui contient deux des axes, par

exemple, L et L'. Ces axes seront représentés par deux lignes Ox, Oy et le troisième se projettera en O. Nous pouvons admettre que le point de concours O des trois axes est un nœud, et nous savons alors que Ox et Oy sont

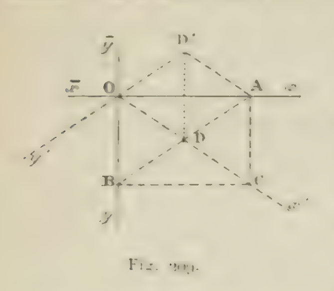


Fig. 209.

des rangées. Soient, sur ces deux rangées, A et B les deux nœuds les plus voisins de O. En construisant le rectangle OABC, nous sommes sûrs que C sera un nœud. S'il n'en existe pas d'autre dans l'intérieur du rectangle, la maille sera précisément ce rectangle. S'il en existe un, ce ne peut être que le centre D du rectangle. En effet, Ox étant un axe binaire, une rotation de 180° doit amener D, dans le plan xy, sur un nœud symétrique D'. Mais DD', étant parallèle à Oy, ne peut avoir d'autre paramètre que OB. Donc DD' = OB. Donc le point D doit être à égale distance de OA et de BC. Pour la même raison, à cause de l'axe binaire Oy, il doit être à égale distance de OB et de AC. Donc il occupe le centre du rectangle. Dans ce cas, la maille est le losange ou rhombe AODD'. Ainsi la maille peut être un rectangle ou un rhombe. Si les projections des nœuds du plan limitrophe coïncident avec celles du plan xOy, le noyau de l'assemblage sera évidemment un prisme droit, à base rectangle dans le premier cas, à base

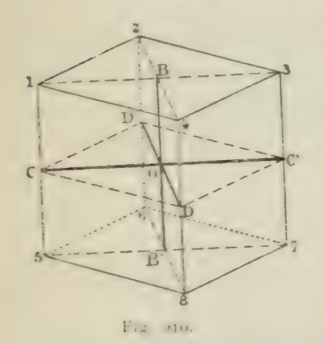


Fig. 210.

rhombe dans le second, ayant pour hauteur la distance des deux plans. Ce sera donc un *prisme rectangulaire droit* ou un *prisme orthorhombique*, dit plus simplement *rhombique*.

En discutant les autres hypothèses qui peuvent être faites sur la position des projections, on trouverait (1) qu'il y a quatre modes possibles, qui sont : le mode rectangulaire droit; le mode orthorhombique; le mode rectangulaire à faces centrées et le mode orthorhombique à faces centrées.

Si nous isolons un noyau rhombique (fig. 210), nous verrons facilement que ses trois axes binaires sont l'un OB, demi-hauteur du prisme, et les deux autres, OC et OD, demi-diagonales de la base rhombe. Les trois plans de symétrie sont : 1° le plan CDC'D' qui contient les deux axes binaires horizontaux ; 2° les deux plans menés par BB' et par chacun des axes OC, OD, c'est-à-dire les plans diagonaux du prisme rhombique.

Choix des axes. Forme oblique. — On peut choisir, comme axes coordonnés, soit les axes binaires Ox et Oy (fig. 209), soit les côtés Ox' et Oy' du rhombe, c'est-à-dire les diagonales du rectangle. Dans ce cas, le paramètre des nouveaux axes se déduisant de ceux des premiers par la règle du parallé-

(1) Voir Mallard. *Traité de Cristallographie*, I, p. 163.

logramme, la relation établie pour le précédent système subsiste encore. Si donc (qrs) est le symbole d'une face déterminante, rapportée aux axes Ox, Oy et à l'axe vertical Oz, et $(q'r's')$ le symbole de la même face, rapportée à Ox', Oy' et Oz (ce dernier axe n'étant pas changé), on aura

$$q' = q + r \quad r' = -q + r \quad s' = s$$
$$q = q' - r' \quad r = q' + r' \quad s = 2s'.$$

La forme oblique du système terbinaire comporte $2 \times (1 + 3) = 8$ faces. Soit QR (fig. 211) la trace, sur le plan des xy, de la face déterminante (qrs). Ici les trois caractéristiques ne sont plus inversement proportionnelles aux longueurs interceptées, car les trois axes ont des paramètres différents a, b, c. On a donc $OQ = \frac{1}{q} . a$, $OR = \frac{1}{r} . b$, et la longueur OS, projetée en O, est égale à $\frac{1}{s} . c$.

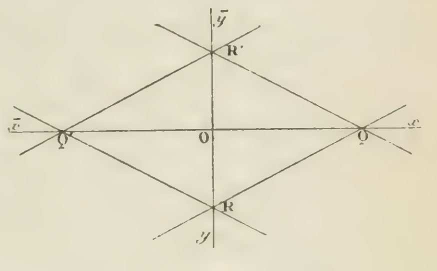


Fig. 211.

Si l'on fait tourner (qrs) de 180° autour de l'axe Oz projeté en O, le point d'intersection avec cet axe ne changeant pas, la trace QR se transporte en Q'R'. On a donc $OQ' = -\frac{1}{q} a$, $OR' = -\frac{1}{r} b$. La seconde face a dès lors pour symbole $(\bar{q}\bar{r}s)$. Si maintenant on imprime à (qrs) une rotation de 180° autour de Ox, QR se transporte en QR', l'intersection avec Oz passe sous le plan des xy, à la même distance de Q, et la nouvelle face est notée $(q\bar{r}\bar{s})$. Enfin une rotation autour de Oy, substituant RQ' à RQ, donnerait $(\bar{q}r\bar{s})$.

Ces quatre faces constituent par leur ensemble la demi-forme directe. En répétant chacune d'elles relativement au centre, ce qui se fait évidemment en changeant tous les signes, on obtient la demi-forme inverse et l'on peut dresser le tableau suivant :

DEMI-FORME DIRECTE		DEMI-FORME INVERSE	
I. Λ^2	II. L^2, L'^2	III. C, Π	IV. P, P'
qrs $\bar{q}\bar{r}s$	$q\bar{r}\bar{s}$ $\bar{q}r\bar{s}$	$\bar{q}\bar{r}\bar{s}$ $qr\bar{s}$	$\bar{q}rs$ $q\bar{r}s$

L'axe vertical a été mis en évidence sous le signe Λ, et le plan perpendiculaire sous le signe Π, à cause du plan de projection choisi ; mais il est clair que

rien ne distingue A et que L ou L′ eussent pu, au même titre, être choisis pour présider à la première colonne.

Octaèdre rhombique. — A chaque face (qrs) correspond une face $(qr\bar{s})$, symétrique de la première relativement à un plan de symétrie, ici le plan xz. Ces deux faces coupant l'axe Oz au même point, il en résulte que la forme oblique se compose de deux pyramides quadrangulaires, symétriques relativement au plan xy, sur lequel elles se raccordent suivant un rhombe ou losange RQR′Q′. Le polyèdre ainsi formé est un *octaèdre rhombique* (fig. 212) et la base rhombe a ses diagonales parallèles aux axes binaires Ox et Oy, tandis que la *hauteur* de l'octaèdre est dirigée suivant le troisième axe Oz.

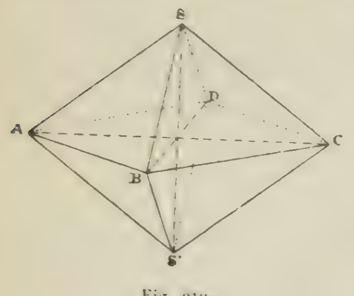


Fig. 212.

Comme d'ailleurs les trois plans de symétrie et les trois axes ont la même valeur, ne différant les uns des autres que par les paramètres, on peut prendre comme plans de projections soit xz, soit yz, et toujours la forme sera un octaèdre rhombique, ayant, dans le second cas, sa base rhombe dans xz et sa hauteur suivant Oy et, dans le troisième, sa base suivant yz et sa hauteur suivant Ox.

On remarquera que les deux faces SAB, S′AB de l'octaèdre rhombique, se rencontrant suivant AB, et les deux faces SDC, S′DC, se rencontrant suivant DC, forment, par leur ensemble, un prisme parallèle à AB, dont la section droite serait le plan mené par SS′ normalement à AB. De même, les quatre autres faces formeraient un prisme, ayant ses arêtes parallèles à AD = BC. Ainsi l'octaèdre rhombique résulte de la pénétration mutuelle de deux prismes rhombiques, c'est-à-dire que ses huit faces sont réparties entre deux zones, ayant pour arêtes, l'une AB, l'autre BC. Mais on pourrait tout aussi légitimement les grouper autour des arêtes SA, SC, ou bien SB, SD, et dire, par exemple, que l'octaèdre est formé par la pénétration de deux prismes,

l'un, SAB, SBC, S′AD, S′DC; l'autre, SAD, SDC, S′BC, S′AB.

Protopyramides, Macropyramides, Brachypyramides. — Il reste maintenant à déterminer la valeur des trois paramètres. Cette détermination dépend évidemment de l'arbitraire du cristallographe. On choisit celle des pyramides qui est la plus fréquente dans les cristaux de la substance et on la considère comme déterminant la *forme primitive* du système, de telle sorte que, pour la face QRS, on a $OQ = a$, $OR = b$, $OS = c$, a, b, c étant les trois paramètres. De cette façon, $q = r = s = 1$ et le symbole de cette forme, dite *Protopyramide fondamentale*, est $\{111\}$.

Cela posé, ayant pris pour axe vertical la direction qui prédomine en général

parmi les formes prismatiques de la substance, on oriente la protopyramide fondamentale de telle sorte que le plan vertical du tableau passe par celle des diagonales de la base rhombe *ab* qui a le plus grand paramètre. On donne à cette dernière le nom de *macrodiagonale* et l'on en fait l'axe des x, tandis que l'axe des y est formé par la *brachydiagonale* (1).

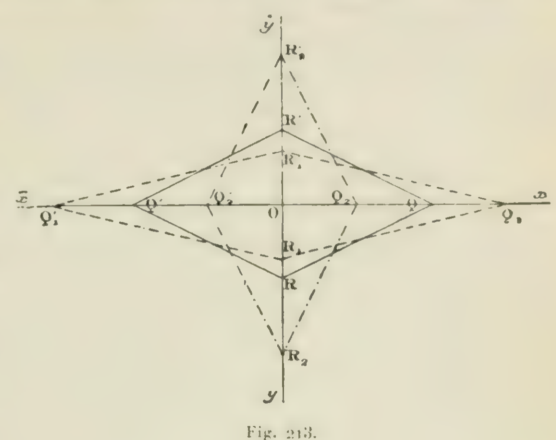


Fig. 213.

Cette orientation une fois adoptée, toutes les pyramides pour lesquelles, s étant quelconque, $q=r$, de sorte que leur symbole est $\{rrs\}$, coupent le plan des xy suivant un losange semblable au losange fondamental.

Elles ne diffèrent de la pyramide primitive que parce qu'elles sont plus ou moins surbaissées et on les groupe sous le nom de *protopyramides*.

Soit RQR'Q' (fig. 213) le losange fondamental. Toute pyramide $\{qrs\}$, pour laquelle on a $\frac{1}{q} > \frac{1}{r}$ ou $q < r$, coupera le plan xy suivant un rhombe $R_1Q_1R'_1Q'_1$, allongé dans le sens de la macrodiagonale. On lui donnera, pour cette raison, le nom de *macropyramide*. De ce nombre seront, par exemple, les formes $\{121\}$, $\{131\}$, $\{122\}$, $\{231\}$, etc. Au contraire, si l'on a $q > r$, la base rhombe $R_2Q_2R'_2Q'_2$ sera allongée dans le sens de la brachydiagonale et donnera lieu à une *brachypyramide*, telle que $\{311\}$, $\{321\}$, $\{211\}$, $\{313\}$, etc.

Formes parallèles. Prismes et dômes.

1° *Formes parallèles à l'axe vertical* :

Les formes correspondantes sont la limite des pyramides $\{qrs\}$, lorsque, la rencontre avec l'axe vertical s'éloignant de plus en plus de l'origine, s tend vers zéro. A ce moment, la pyramide inférieure et la pyramide supérieure se confondent en une seule, dont toutes les faces sont directement semblables, et forment un prisme $\{qro\}$, ayant pour section droite le rhombe qr de la figure 211. Ce prisme est dit *orthorhombique*. Les prismes pour lesquels on a $q < r$, et qui sont la limite des macropyramides, sont des *macroprismes*. Les *brachyprismes* correspondent à $q > r$. Enfin, si $q=r=1$, on a le *protoprisme* $\{110\}$, limite des protopyramides.

2° *Formes parallèles à l'axe* Ox :

(1) C'est ce qu'a fait Miller. Naumann a procédé de façon inverse. Les notations correspondant à cette seconde manière de faire sont indiquées dans les tableaux qui terminent cet ouvrage.

Rien d'essentiel ne distinguant les trois axes binaires, toute forme parallèle à l'un quelconque d'entre eux est prismatique comme celle qui vient d'être définie. Cependant on convient d'attribuer le nom de *dômes* aux prismes dont les arêtes sont parallèles au plan horizontal xy.

Cela posé, la forme parallèle à l'axe Ox, et dont le symbole est évidemment { ors }, représente un dôme allongé suivant la macrodiagonale, c'est-à-dire un *macrodôme*. Celui des macrodômes pour lequel $r = s = 1$ est le *protomacrodôme* { 011 }.

3° *Formes parallèles à l'axe* Oy :

De même, les dômes { qos }, allongés suivant la brachydiagonale, deviennent des *brachydômes*, et la forme { 101 } est le *protobrachydôme*.

Formes normales. — Les formes respectivement normales aux trois axes sont de même essence, se réduisant à deux faces parallèles, qui servent à limiter les prismes ou les dômes ayant pour arête l'axe auquel la forme est normale. Cependant on réserve le nom de *bases* aux deux faces de la forme { 001 }, normale à l'axe vertical, tandis que la qualification de *pinacoïdes* est appliquée aux deux autres formes normales. Celle qui est normale à Oy, et qui, par conséquent, est allongée suivant Ox, est le *macropinacoïde* { 010 }.

L'autre est le *brachypinacoïde* { 100 }.

Chacune de ces formes est la limite vers laquelle tendent respectivement, d'un côté les macroprismes, de l'autre les brachyprismes, lorsque deux faces adjacentes en viennent à se confondre.

§ 2

FORMES COMPOSÉES. PERSPECTIVE STÉRÉOGRAPHIQUE. FORMES MÉRIÉDRIQUES

Forme primitive de Lévy. — Dans le système de notation de Lévy, la forme primitive du système terbinaire est le *protoprisme orthorhombique* { 110 }, c'est-à-dire le prisme qui a pour base le rhombe construit sur les paramètres des deux axes binaires horizontaux. La base de ce prisme (fig. 214), qui n'est autre que sa section droite rhombique, est notée p. Les faces verticales, identiques entre elles comme également inclinées sur les plans de symétrie, sont des faces m. Il y a deux catégories d'angles : les angles obtus a et les angles aigus e. Les arêtes de la base, égales entre elles comme symétriques relativement aux axes binaires, sont notées b, les axes binaires horizontaux étant représentés par les diagonales du rhombe. Enfin il y a deux catégories d'arêtes verticales : les arêtes g des angles dièdres aigus et les

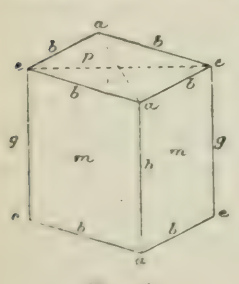


Fig. 214.

arêtes h des angles obtus, les unes et les autres étant parallèles à l'axe binaire vertical et possédant par conséquent le même paramètre, bien qu'elles n'aient pas la même valeur cristallographique ; car elles ne peuvent être substituées les unes aux autres en vertu de la symétrie du polyèdre parallélépipédique.

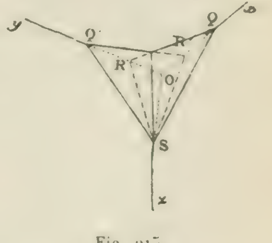


Fig. 215.

Toute modification de la forme primitive doit s'obtenir par troncature des angles ou des arêtes. La face déterminante sera définie, dans le cas le plus général (fig. 215), par les longueurs $OQ = \frac{1}{q'} . a'$, $OR = \frac{1}{r'} . a$, qu'elle intercepte sur deux arêtes horizontales b, de même paramètre a', et par la longueur $OS = \frac{1}{s'} . c'$, interceptée sur l'arête verticale g ou h, de paramètre c'. La notation de la troncature devra donc se déduire du symbole $\{ q'r's' \}$, rapporté à trois axes, dont l'un est l'axe vertical de la notation de Miller de telle sorte que $c' = c$, tandis que les deux autres, non rectangulaires entre eux, sont les diagonales du rectangle ab et ont, pour valeur paramétrique, $a' = \sqrt{a^2 + b^2}$. Dans ce cas, nous connaissons les relations qui unissent les caractéristiques q', r', s' à q, r, s, et qui sont :

$$q' = q + r \qquad r' = -q + r \qquad s' = s.$$

Ce point établi, passons en revue les diverses espèces de modifications.

Modifications sur les angles. — Chaque angle est remplacé par deux facettes, puisque les deux arêtes b concourantes sont de même valeur et doivent être modifiées de la même façon. S'il s'agit d'un angle a, les longueurs interceptées étant proportionnelles, sur les arêtes b, à $\frac{1}{q'}$ et $\frac{1}{r'}$, sur l'arête h, à $\frac{1}{s'}$, la forme doit être notée :

$$\{ b^{\frac{1}{r'}} \; b^{\frac{1}{q'}} \; h^{\frac{1}{s'}} \}.$$

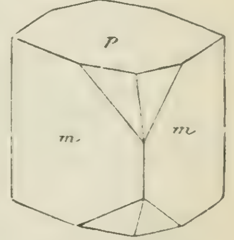


Fig. 216.

Il est facile de voir (fig. 216) qu'elle doit se composer de huit faces, quatre à quatre concourantes, et donner lieu à une pyramide allongée suivant la macrodiagonale ou *macropyramide*. En exprimant q', r', s' en fonction de q, r, s, le symbole devient

$$\{ b^{\frac{1}{r-q}} \; b^{\frac{1}{q+r}} \; h^{\frac{1}{s}} \},$$

correspondant à $\{ qrs \}$ avec $q < r$.

Sur les angles e, la modification, de même forme générale, prendrait le symbole

$$\{ b^{\frac{1}{r'}} \; b^{\frac{1}{q'}} \; g^{\frac{1}{s'}} \} = \{ b^{\frac{1}{q-r}} \; b^{\frac{1}{q+r}} \; g^{\frac{1}{s}} \},$$

correspondant à $\{qrs\}$ avec $q > r$. Ce serait une *brachypyramide* (fig. 217). $\{231\} = b^1\, b^{\frac{1}{3}}\, h^1$ et $\{131\} = b^{\frac{1}{2}}\, b^{\frac{1}{4}}\, h^1$ sont des macropyramides, tandis que $\{311\} = b^{\frac{1}{2}}\, b^{\frac{1}{4}}\, g^1$ et $\{323\} = b^1\, b^{\frac{1}{5}}\, g^{\frac{1}{3}}$ sont des brachypyramides.

Quand on a $r - q = s$, comme dans $\{132\} = b^{\frac{1}{2}}\, b^{\frac{1}{4}}\, h^{\frac{1}{2}}$, la macropyramide correspondante s'écrit $a_{\frac{s}{q}}$, dans ce cas, a_2.

De même une brachypyramide avec $q - r = s$, comme $\{312\}$, s'écrit $e_{\frac{s}{q}}$, par exemple e_2.

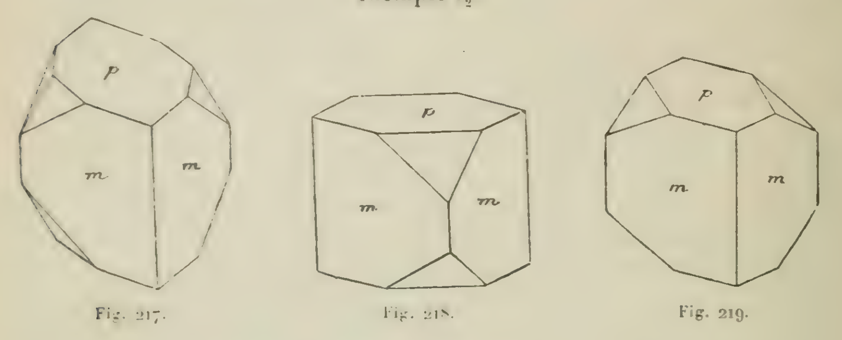


Fig. 217. Fig. 218. Fig. 219.

Si l'on a $q' = r'$, la modification, sur les angles a comme sur les angles e, ne se compose que d'une seule facette symétrique et conduit à un prisme indéfini horizontal ou dôme. Les dômes des angles a, ou *macrodômes* (fig. 218), correspondent à la fois à $\{r'\, r'\, s'\}$ et à $\{ors\}$ et doivent avoir pour symbole

$$\{ b^{\frac{1}{r'}}\, b^{\frac{1}{r'}}\, h^{\frac{1}{s'}} \}$$

ou, par abréviation, $a^{\frac{r'}{s'}}$. Mais $s' = s$ et $r' = -q + r = r$, puisque, dans cette hypothèse, $q = 0$. Donc le symbole des macrodômes est $a^{\frac{s}{r}}$ et le protomacrodôme $\{011\}$ a pour symbole a^1.

Les dômes des angles e ou *brachydômes* (fig. 219) correspondront à $\{q'\, q'\, s'\}$ ou $\{qos\}$. Leur symbole sera

$$b^{\frac{1}{q'}}\, b^{\frac{1}{q'}}\, g^{\frac{1}{s'}} = e^{\frac{s'}{q'}} = e^{\frac{s}{q}},$$

puisque $q' = q + r = q + 0 = q$. Ainsi le protobrachydôme $\{101\}$ sera noté e^1.

Modifications sur les arêtes. — Une modification sur les arêtes b se fait par une facette parallèle à chaque arête b et, par conséquent interceptant des longueurs égales sur les deux autres arêtes b, parallèles entre elles, qui aboutissent à la première. Soit $\frac{1}{q}$ le coefficient de ces longueurs ; le symbole, répondant à $\{rrs\}$, sera $b^{\frac{s'}{q'}}$, et comme $s' = s$, $q' = q + r = 2r$, r étant, dans ce cas, égal à q, la notation deviendra $b^{\frac{s}{2r}}$ ou $b^{\frac{s}{2q}}$.

On voit d'ailleurs que la forme est une *protopyramide* (fig. 220). La protopyramide fondamentale $\{111\}$ prend pour symbole $b^{\frac{1}{2}}$.

Deux arêtes b venant aboutir sur un angle a au même point qu'une arête h, une facette parallèle à h et interceptant, sur les arêtes horizontales, des longueurs proportionnelles à $\frac{1}{q'}$ et $\frac{1}{r'}$, doit se répéter deux fois. L'arête h est donc remplacée par un biseau qui, réuni au biseau opposé, donne un *macroprisme* (fig. 221) de notation

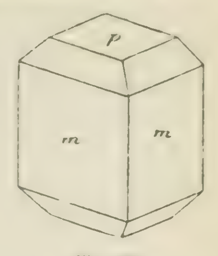


Fig. 220.

$$h^{\frac{q'}{r'}} = h^{\frac{q'+r'}{r'-q'}}.$$

De même une modification parallèle aux arêtes g donne un *brachyprisme* (fig. 222) noté $g^{\frac{q'}{r'}} = g^{\frac{q'+r'}{q'-r'}}$.

Enfin il est aisé de voir que le macropinacoïde (fig. 223), qui est la limite du macroprisme, quand $q' = r'$, doit être noté h^1, tandis que le brachypinacoïde (fig. 224) doit avoir pour notation g^1.

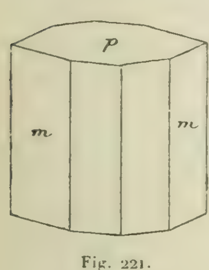



Fig. 221.

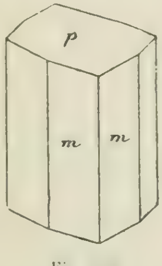


Fig. 222.

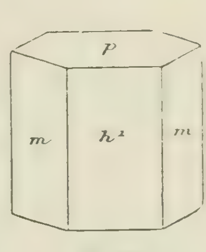


Fig. 223.

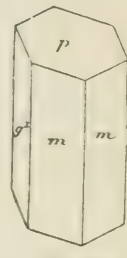


Fig. 224.

On remarquera que, dans ce système de notation, les trois plans de symétrie correspondent respectivement à p, h^1 et g^1.

Perspective stéréographique. Relations de zones. — Pour représenter le système terbinaire en perspective stéréographique, on choisit (fig. 225) pour plan fondamental le plan de la base rhombe, dont la normale se projette au centre p. Alors les pôles des faces du protoprisme viennent en m, m, m, m, sur la circonférence du cercle de perspective, où leur position se détermine par la connaissance de l'angle m/m. Les pôles h^1 du macropinacoïde viennent au milieu des plus petits arcs mm et les pôles g^1 au milieu des plus grands.

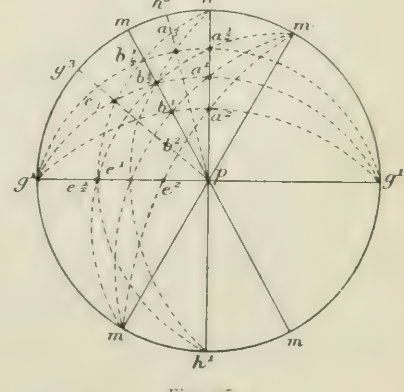


Fig. 225.

Les arêtes b étant les intersections des faces m avec la base p, sont les arêtes des zones mp. Par conséquent, toutes les protopyramides doivent avoir leurs pôles sur les deux lignes mp. Ceux des macropyramides tombent dans

les secteurs mpm qui ont pour bissectrice h^1, tandis que les brachypyramides s'échelonnent sur les arcs mg^1m.

Les macrodômes auront évidemment leurs pôles sur ph^1, les brachydômes sur pg^1. Les pôles des macroprismes tomberont sur le cercle entre un point m et le pôle h^1 le plus voisin, tandis que ceux des brachyprismes s'échelonneront entre m et g^1.

L'une des protopyramides ayant été choisie pour déterminer la forme fondamentale $\{111\}$, qui définit les trois longueurs d'axes, la mesure de l'angle des faces de cette pyramide avec p ou avec m permet de placer le pôle $b^{\frac{1}{2}}$. Alors le cercle $g^1\, b^{\frac{1}{2}}$ rencontrera ph^1 en a^1, pôle du protomacrodôme. Cela fait, il suffira de tracer le cercle allant de a^1 au pôle m le plus voisin pour rencontrer pm en b^1 et pg^1 en e^1, pôle du protobrachydôme. Puis le cercle $b^1\, g^1$ donnera a^2, et le cercle ma^2 donnera b^2 et e^2, tandis que $mb^{\frac{1}{2}}$ donnerait $e^{\frac{1}{2}}$ et $a^{\frac{1}{2}}$. Toutes ces relations seraient faciles à justifier à l'aide de la formule des zones. Quant à une démonstration directe, nous nous bornerons à faire voir que a^1 doit être en zone avec deux faces adjacentes de $b^{\frac{1}{2}}$ et avec les faces du brachypinacoïde g^1.

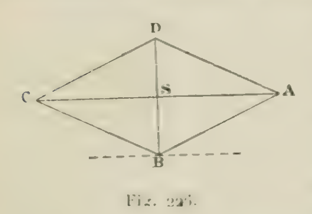


Fig. 226.

Soit SABCD (fig. 226) la projection de la protopyramide fondamentale $\{111\} = b^{\frac{1}{2}}$ sur le plan de sa base rhombe. Pour qu'un macrodôme, parallèle à la diagonale AC, intercepte sur l'axe vertical et sur SB les mêmes longueurs que SABCD, il faut qu'il soit tangent à l'arête projetée en SB, c'est-à-dire parallèle à l'intersection mutuelle de deux faces $b^{\frac{1}{2}}$. Mais cette intersection est aussi celle des deux faces $b^{\frac{1}{2}}$ avec le plan vertical DB, lequel n'est autre que le plan de symétrie parallèle au brachypinacoïde. Donc ce dernier forme zone avec deux faces de $b^{\frac{1}{2}}$, adjacentes à un angle a, et avec la face intermédiaire du protomacrodôme.

Relations angulaires. Rapport d'axes. — En appliquant à la figure 225 les règles de la trigonométrie sphérique, on trouvera facilement les relations angulaires qui unissent les pôles des formes fondamentales. Ainsi, dans le triangle rectilatère $pb^{\frac{1}{2}}\, h^1$, on a

$$\cos b^{\frac{1}{2}}\, h^1 = \sin pb^{\frac{1}{2}} . \cos mh^1 ;$$

de même, le triangle $pb^{\frac{1}{2}}\, g^1$ donne

$$\cos b^{\frac{1}{2}}\, g^1 = \sin pb^{\frac{1}{2}} . \cos mg^1 .$$

On aurait de même

$$\cos ma^1 = \sin pa^1 . \cos mh^1 .$$

Bien entendu, les angles dont il est ici question ne sont pas ceux des faces correspondantes, mais ceux des *normales à ces faces*.

Appelons a, b, c les paramètres des trois axes, a s'appliquant à la brachydiagonale, b à la macrodiagonale et c à l'axe vertical. On a l'habitude de prendre b pour unité, auquel cas le rapport devient $a : 1 : c$. Pour fixer ce rapport, on choisit arbitrairement une protopyramide, à laquelle on donne le symbole $b^{\frac{1}{2}} = \{111\}$. On mesure l'angle obtus de la face $b^{\frac{1}{2}}$ avec la base p et, si l'on prend le supplément aigu de cet angle, en le désignant par $pb^{\frac{1}{2}}$, il est aisé de voir qu'on a :

$$tg\, pb^{\frac{1}{2}} .\, cos\, mg = c, \qquad tg\, pb^{\frac{1}{2}} .\, sin\, mg^1 = \frac{c}{a}.$$

Mais ici mg^1 est la moitié de l'angle obtus mm (1).

D'ailleurs, en assignant à mg^1 la même valeur, il est évident qu'on a :

$$a = cot\, mg^1.$$

Formes mériédriques. — 1° *Polyèdres holoaxes hémisymétriques.*

$$\Lambda^2, L^2, L'^2.$$

La forme oblique $\{qrs\}$, perdant la moitié de ses faces, se transforme en une pyramide à quatre faces non parallèles, ayant la forme d'un tétraèdre irrégulier ou *sphénoïde*. Aucune autre forme n'est affectée par ce genre de mériédrie, réalisé dans le sulfate de magnésie (fig. 227), où deux faces b^1 forment, au-dessus du prisme m, une sorte d'hémidôme, tandis qu'au-dessous deux autres faces b^1 constituent un hémidôme inverse du premier.

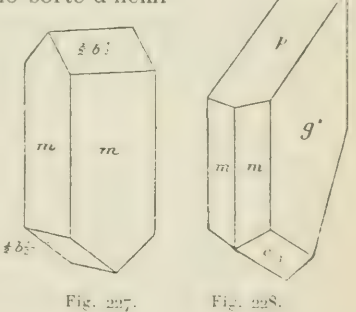


Fig. 227. Fig. 228.

2° *Polyèdres hémiaxes.*

Il faut que deux des axes binaires disparaissent, sans quoi l'axe horizontal conservé, réuni à l'autre, entraînerait l'existence du troisième. D'ailleurs il ne peut pas y avoir de centre, car la présence du centre, combinée avec celle des plans, restituerait tous les axes, à moins de retomber, par le symbole Λ^2, C, II, dans le cas de la symétrie simplement binaire. Enfin on ne peut pas garder les trois plans ensemble, car l'un d'eux, normal à l'axe conservé, restituerait le centre. Le seul symbole possible est donc Λ^2, P, P'.

Cette réduction ne saurait affecter les formes parallèles à l'axe conservé, lesquelles, étant normales au plan supprimé, ne souffrent pas de sa suppression.

Toutes les autres formes sont affectées et, comme il est aisé de le voir, donnent lieu à des cristaux hémimorphes, puisque, à supposer, par exemple,

(1) Ces formules diffèrent à quelques égards de celles qu'on trouvera dans le *Traité* de Mallard. Cela tient à ce que les formules du *Traité* s'appliquent aux *réseaux polaires* et ne font intervenir que les suppléments des angles des faces.

A^2 vertical, il n'y a pas d'éléments horizontaux de symétrie, relativement auxquels un pointement puisse être répété.

Ce cas est réalisé dans la topaze et surtout dans la calamine. Le plus souvent cette substance se présente en cristaux prismatiques très allongés suivant g^1, et offrant, d'un côté la base p, de l'autre la moitié de la brachypyramide e_3 (fig. 228).

CHAPITRE VI

SYSTÈMES BINAIRE (MONOCLINIQUE) ET TRICLINIQUE

§ 1

NOYAU ET FORMES SIMPLES DU SYSTÈME BINAIRE OU MONOCLINIQUE (CLINORHOMBIQUE)

Noyau de l'assemblage. — La maille du réseau plan, normal à l'axe binaire unique, n'est assujettie à aucune condition particulière. Ce sera donc un parallélogramme ordinaire, tel que $A_0A'_0A_1A'_1$ (fig. 229). Faisons passer un plan par $A_0A''_0$ et par l'axe binaire qui passe en A'_0. En choisissant ce plan comme

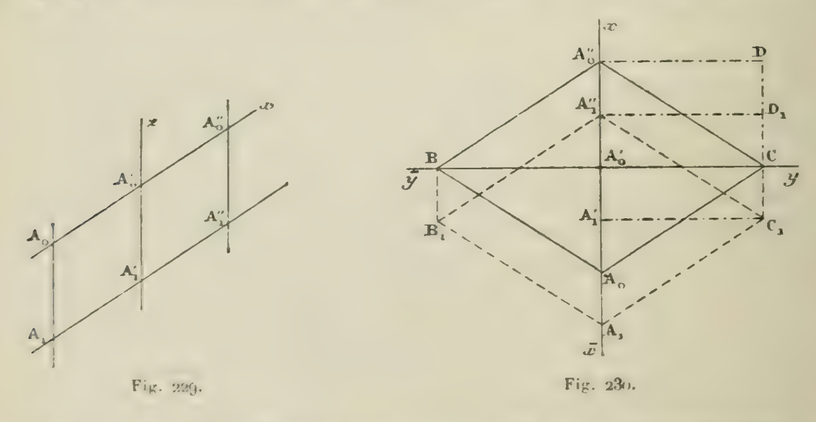


Fig. 229. Fig. 230.

plan de projection, l'axe binaire sera représenté par une ligne BC (fig. 230), normale à la trace $A_0A''_0$ du plan de symétrie. Soient B et C deux nœuds de l'axe binaire, limitrophes de A'_0. Ces nœuds, combinés avec A_0 et A''_0, déterminent un rhombe centré $A_0BA''_0C$. Un rhombe égal existe en $A_1B_1A''_1C_1$, dans le plan inférieur. Le noyau de l'assemblage peut donc être considéré comme un prisme oblique, ayant pour base un rhombe centré et, pour arête, la direction A_0A_1. Mais on peut aussi, complétant le rectangle $A'_0A''_0DC$, le consi-

dérer comme un prisme oblique à base rectangle, avec arêtes parallèles à A_0A_1. Une discussion plus approfondie montrerait qu'il n'y a que deux modes possibles, le mode du prisme oblique à base rectangle et le mode du prisme oblique à base rhombe, la base étant, dans les deux cas, dans un plan normal au plan de symétrie, qui contient l'un des côtés du rectangle ou l'une des diagonales du rhombe. C'est pourquoi le système binaire est appelé, tantôt système du *prisme rectangulaire oblique symétrique*, tantôt système *clinorhombique*, pour marquer que l'une des diagonales du rhombe de base est inclinée sur l'arête formant la hauteur du noyau, tantôt enfin système *monoclinique*, pour indiquer que, l'angle de ces deux lignes s'ouvrant dans un plan normal à la base, l'arête prismatique ne penche ni à droite ni à gauche de ce plan, mais seulement en avant.

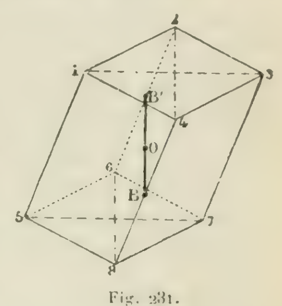


Fig. 231.

Si nous considérons le noyau monoclinique de profil (fig. 231), c'est-à-dire avec son plan de symétrie 1.3.5.7 disposé sur le plan du tableau, nous verrons l'axe binaire BB' former une ligne joignant les milieux des arêtes 2.6 et 4.8, parallèlement aux deux diagonales 2.4 et 6.8 des bases rhombes. On voit aisément que, seule, une rotation de 180 degrés autour de cette ligne peut restituer les divers sommets du parallélépipède.

Forme oblique. — La forme oblique du système ne doit comprendre que $2 \times (1 + 1)$ ou 4 faces. Considérons le rhombe $A_0BA''_0C$ de la figure 230. L'une de ses diagonales est l'axe binaire BC, normal au plan de symétrie. Nous l'appellerons *orthodiagonale*, en la choisissant pour axe des y. L'autre, qui lui est perpendiculaire, mais qui est inclinée sur A_0A_1, est $A_0A''_0$; ce sera la *clinodiagonale* et, en même temps, l'axe des x. Enfin l'arête $A'_0A'_1$ sera choisie pour axe vertical et les parties positives des x et des z seront comptées dans l'angle obtus des deux axes.

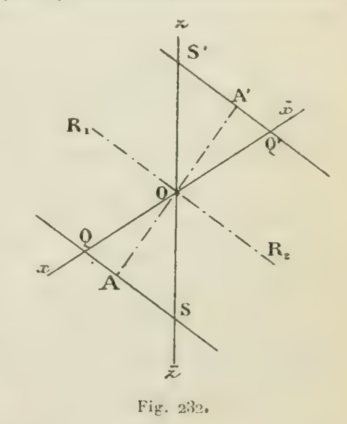


Fig. 232.

Cela posé, une face $(qr\bar{s})$ étant donnée, qui coupe Ox en Q, Oy en R, projeté sur O, et Oz en S (fig. 232), sa rotation autour de l'axe binaire O engendrera une autre face Q'RS', de symbole $(\bar{q}rs)$ et l'ensemble formera un biseau, dont l'arête, passant en R, sera une parallèle à QS, projetée en R_1OR_2.

Si maintenant on répète $(qr\bar{s})$ relativement au centre O, on obtiendra une face partant de Q'S' et coupant l'axe binaire, sous le plan du tableau, à une distance $R'O = RO$. Son symbole sera $(\bar{q}\bar{r}s)$ et, jointe à l'autre face $(q\bar{r}\bar{s})$, elle formera un autre biseau parallèle au premier. L'ensemble donnera lieu à un prisme,

aux arêtes parallèles à QS et normales à l'axe binaire. La section droite de ce prisme sera un rhombe, ayant pour diagonales la portion RR' de l'axe binaire et la perpendiculaire commune AA' aux deux traces QS et Q'S'.

Une pyramide octaédrique pouvant être considérée comme formée par l'enchevêtrement de deux prismes (1), qui ont pour arêtes respectives les côtés de la base rhombe, le prisme constituant la forme oblique du système binaire prend le nom d'*hémipyramide*.

Si l'on a r et s positifs et que q soit plus grand que r, ce qui veut dire que la longueur interceptée sur la clinodiagonale est proportionnellement plus petite que celle interceptée sur l'orthodiagonale, le prisme, allongé dans le sens de cette dernière, prend le nom d'*hémiorthopyramide*. Si, en même temps, q est positif, l'hémipyramide est dite *antérieure*. Elle serait postérieure pour q négatif, c'est-à-dire avec $\{\bar{q}rs\}$.

De même, pour $q < r$, on obtient une *hémiclinopyramide*, antérieure avec q positif, postérieure avec q négatif.

Pour $q = r$, la forme $\{rrs\}$ est assise sur les côtés mêmes de la base rhombe $A_{''}BA'_{''}C$ (fig. 230). Elle devient une *protohémipyramide*, *antérieure* pour $\{rrs\}$, *postérieure* pour $\{\bar{r}rs\}$.

Si $r = s = 1$, on a les *protohémipyramides fondamentales*.

Pour $q = 0$, la forme $\{ors\}$ devient un prisme, dont les arêtes sont parallèles à la clinodiagonale. On l'appelle *clinodôme*.

Pour $s = 0$, soit $\{qro\}$, le prisme est parallèle à l'arête z, qu'on a coutume de placer verticalement. Avec $q < r$, ce prisme est allongé suivant la clinodiagonale et devient un *clinoprisme*. Ce serait un *orthoprisme* dans le cas contraire. $\{110\}$ donne le *protoprisme*, limite des deux séries.

Formes parallèles : formes normales. — Comme il n'y a qu'un seul axe binaire, il n'y a qu'une variété de formes parallèles. Ce sont celles qui correspondent au symbole $\{qos\}$. Elles se composent de deux faces parallèles, formant ensemble la moitié d'un prisme à arêtes horizontales, c'est-à-dire d'un dôme. Et comme les arêtes ont la direction de l'orthodiagonale, la forme est un *hémiorthodôme*, antérieur pour q positif, postérieur pour q négatif.

Dans le cas particulier où $s = 0$, cet hémidôme devient parallèle à l'arête verticale et forme l'*orthopinacoïde* $\{100\}$.

Mais on peut aussi, s n'étant pas nul, avoir $q = 0$. Alors l'hémidôme se confond avec le plan du rhombe fondamental et donne les *bases* $\{001\}$ du protoprisme.

Il n'y a également qu'une seule forme normale, composée de deux faces parallèles au plan de symétrie et, par conséquent, à la clinodiagonale que ce plan contient. C'est le *clinopinacoïde* $\{010\}$.

(1) Voir plus haut, p. 182.

§ 2

FORMES COMPOSÉES DU SYSTÈME MONOCLINIQUE

Forme primitive de Lévy. — Dans le système de Lévy, la forme primitive est le protoprisme basé, appelé *clinorhombique*, parce que sa base rhombe est inclinée relativement à l'axe vertical, ou encore *monoclinique*. Les axes sur lesquels se comptent les longueurs interceptées sont les arêtes du prisme, et, par conséquent, les côtés du rhombe de base, qui ont des paramètres égaux, sont substitués aux diagonales de ce même rhombe, qui formaient les axes conjugués x et y de Miller. Comme d'ailleurs les côtés et les diagonales du rhombe sont liés ensemble par la loi établie pour tous les parallélogrammes, si q', r' et s' désignent les caractéristiques de Lévy, q, r, s celles de Miller, on a encore

$$q' = q + r \qquad r' = -q + r \qquad s' = s$$
$$q = q' - r' \qquad r = q' + r' \qquad s = 2s'.$$

La base du prisme (fig. 233) étant notée p, les faces prismatiques, identiques entre elles, puisque la section droite est rhombique, sont des faces m. Parmi les angles de la base, il y en a un qui correspond à l'angle aigu du plan de la base avec l'arête prismatique et qu'on note a, tandis que l'angle opposé, obtus, s'appelle o. Ce dernier, qu'on suppose faisant face à l'observateur, est dit *antérieur*; l'autre, a, est l'angle *postérieur*. Les angles latéraux, qui se correspondent de part et d'autre du plan de symétrie, sont des angles e. Parmi les arêtes de la base, celles qui aboutissent à un angle a et qui, pour ce motif, sont les arêtes de dièdres aigus, se notent b, tandis que la lettre d est affectée aux arêtes concourant sur un angle o. Enfin les arêtes prismatiques sont de deux sortes : les arêtes h, situées dans le plan de symétrie, et les arêtes g, se correspondant de part et d'autre, ces deux catégories d'arêtes appartenant à des angles dièdres inégaux.

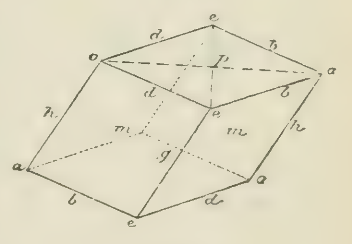


Fig. 233.

Le plan de symétrie est figuré par le plan diagonal qui joint deux angles o et deux angles a, tandis que l'axe binaire est parallèle à la ligne qui joint deux angles e, appartenant à la même base p.

Troncatures sur les angles. — Une troncature est définie, dans le cas le plus général, par les coefficients $\frac{1}{q'}, \frac{1}{r'}, \frac{1}{s'}$, des trois longueurs qu'elle intercepte sur les arêtes du prisme clinorhombique. Pour mettre l'expression de cette

troncature en rapport avec la notation à trois caractéristiques de Miller, il suffira de remplacer q', r', s' par leur valeur en fonction de q, r, s.

Cela posé, une *hémiorthopyramide antérieure* étant une troncature sur un angle o (fig. 234), où aboutissent deux arêtes d et une arête h, son symbole doit être

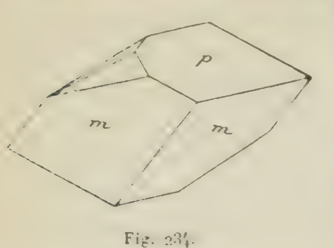


Fig. 234.

$$d^{\frac{1}{q'}}\ d^{\frac{1}{r'}}\ h^{\frac{1}{s'}} = d^{\frac{1}{q+r}}\ d^{\frac{1}{r-q}}\ h^{\frac{1}{s}}.$$

Nous savons d'ailleurs que, dans ce cas, on a $q > r$; donc, pour n'avoir que des symboles positifs, nous écrirons

$$d^{\frac{1}{q+r}}\ d^{\frac{1}{q-r}}\ h^{\frac{1}{s}}.$$

Une *hémiorthopyramide postérieure* tronque un angle a, point de concours de deux arêtes b et d'une arête h (fig. 235). Son symbole est donc

$$b^{\frac{1}{q'}}\ b^{\frac{1}{r'}}\ h^{\frac{1}{s'}} = b^{\frac{1}{q+r}}\ b^{\frac{1}{q-r}}\ h^{\frac{1}{s}}.$$

Une *hémiclinopyramide* tronque l'angle e et a pour symbole général

$$b^{\frac{1}{q'}}\ d^{\frac{1}{r'}}\ g^{\frac{1}{s'}}.$$

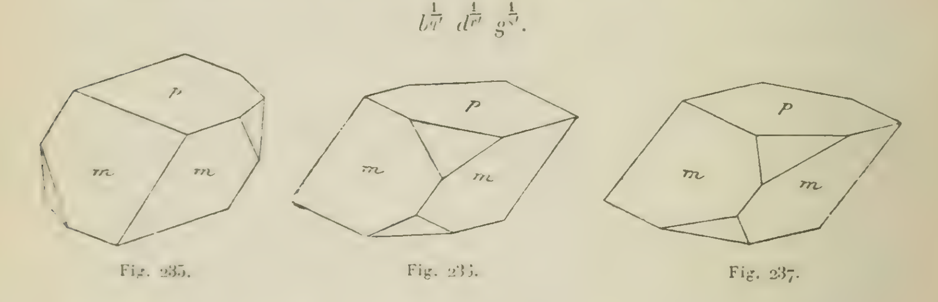


Fig. 235. Fig. 236. Fig. 237.

Elle sera *antérieure* (fig. 236) si l'on a $\frac{1}{q'} > \frac{1}{r'}$ ou $r' > q'$, et on la désignera par

$$d^{\frac{1}{r-q}}\ b^{\frac{1}{q-r}}\ g^{\frac{1}{s}}.$$

Dans le cas contraire, on aura une hémipyramide *postérieure* (fig. 237) avec le symbole

$$b^{\frac{1}{r-q}}\ d^{\frac{1}{q+r}}\ g^{\frac{1}{s}}.$$

Les modifications symétriques sur les angles sont de trois natures : les *hémiorthodômes antérieurs*, installés sur les angles o, où ils tronquent deux arêtes d et une arête h (fig. 238). Leur symbole est

$$d^{\frac{1}{q'}}\ d^{\frac{1}{q'}}\ h^{\frac{1}{s'}} = o^{\frac{s'}{q'}} = o^{\frac{s}{q}}.$$

En effet, la forme correspond à $\{qos\}$, ce qui fait $q' = q + r = q + o = q$.

De même, le symbole des *hémiorthodômes postérieurs* (fig. 239) sera

$$b^{\frac{1}{q'}}\ b^{\frac{1}{q'}}\ h^{\frac{1}{s'}} = a^{\frac{s}{q}}.$$

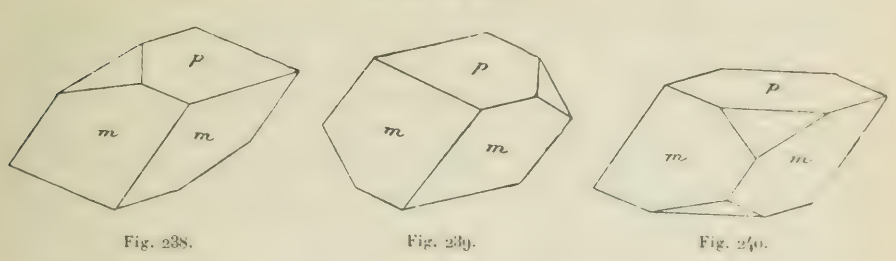


Fig. 238. Fig. 239. Fig. 240.

Enfin, les *clinodômes* (fig. 240) sont symétriques sur les angles e et répondent au symbole $e^{\frac{s}{r}}$.

Troncatures sur les arêtes. — Les *protohémipyramides* sont tangentes

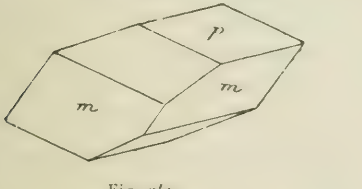


Fig. 241.

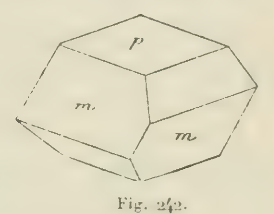


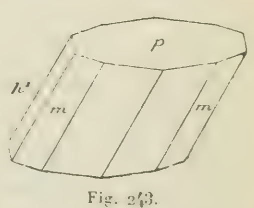
Fig. 242.

aux arêtes b et d de la base rhombe. Les hémipyramides *antérieures* (fig. 241) auront pour symbole

$$d^{\frac{s'}{r'}} = d^{\frac{s}{2r}}$$

et les hémipyramides *postérieures* (fig. 242)

$$b^{\frac{s}{2r}}.$$



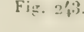


Fig. 243.

Les deux protohémipyramides fondamentales seront donc $d^{\frac{1}{2}}$ et $b^{\frac{1}{2}}$.

Les *orthoprismes* ont pour symbole

$$h^{\frac{q'}{r'}} = h^{\frac{q+r}{q-r}},$$

leur limite étant l'*orthopinacoïde* h^1.

Les *clinoprismes* sont représentés par

$$g^{\frac{q'}{r'}} = g^{\frac{q+r}{r-q}}$$

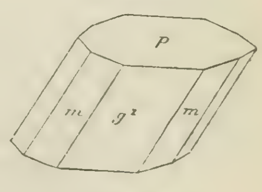


Fig. 244.

ayant le *clinopinacoïde* g^1 pour limite.

La fig. 243 offre la combinaison du protoprisme basé pm avec un orthoprisme et le clinopinacoïde g^1, tandis que, dans la figure 244, se trouve réalisée la combinaison de pm et de h^1 avec un clinoprisme.

Perspective stéréographique. — Pour dresser la perspective stéréographique du système binaire (fig. 245), on choisit le plan de symétrie pour plan fondamental. Son pôle g^1, extrémité de l'axe binaire, forme donc le centre du cercle. Quant à h^1, normal au plan de symétrie, ses pôles tombent sur le cercle fondamental, aux deux extrémités d'un même diamètre. Enfin les bases du protoprisme ont aussi leurs pôles sur le cercle et on les place à l'aide de la connaissance qu'on a de l'angle ph^1. Les faces prismatiques m font évidemment partie de la zone h^1g^1. Elles doivent donc avoir leurs pôles en deux points m, tels que l'arc intercepté soit égal au supplément de l'angle mesuré mm.

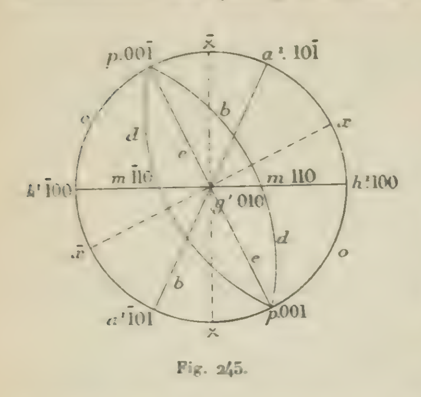


Fig. 245.

Si, au lieu de connaître l'angle ph^1, on connaissait seulement l'angle pm, il suffirait de remarquer que, dans le triangle rectilatère pmg^1, on a

$$\cos pm = \sin mg^1 . \cos pg^1 m.$$

Connaissant pm et mg^1 (qui est la moitié de mm), on en déduirait l'angle $pg^1 m$, ce qui permettrait de placer les points p.

Les hémidômes antérieurs sont situés dans l'angle obtus de p avec h^1. Leurs normales seront donc sur l'arc embrassé par l'angle aigu pg^1h^1. L'un d'eux, dont l'angle avec p est connu, ayant été choisi pour représenter o^1, il suffira de porter le supplément de l'arc po^1 sur la circonférence. On peut tout aussi bien déterminer la forme par un hémidôme postérieur, tel que a^1.

Dès ce moment, tous les éléments du système sont fixés. Les diverses formes s'en déduiront par des combinaisons de zones. D'abord il est clair que les hémidômes postérieurs auront leurs pôles sur le cercle, dans les angles obtus pg^1h^1. D'autre part, les clinodômes, qui font partie de la zone pg^1, auront leurs pôles sur le diamètre pp. Les protohémipyramides antérieures, installées sur les arêtes d, qui correspondent à des dièdres obtus, et faisant partie de la zone pm, seront représentées sur les cercles allant de p en m, dans les angles aigus pg^1h^1, tandis que les parties de ces mêmes cercles, comprises dans les angles obtus pg^1h^1, correspondront aux protohémipyramides postérieures.

Pour se rendre compte des indices que doivent porter les différentes faces, il convient de remarquer que, sur cette perspective (fig. 245), les deux axes des x et des z, contenus dans le plan fondamental, sont, l'un g^1z, perpendiculaire à h^1g^1, l'autre g^1x, perpendiculaire à pg^1. Quant au troisième axe, celui des y, il est normal au plan de symétrie et est représenté par le point g^1. Les parties positives des x et des z étant comptées sur l'angle obtus de ces axes, on voit sans peine que le point m, situé dans l'angle positif xg^1z, correspond à

(110) ; tandis que l'autre est ($\bar{1}10$). On fixe de même les notations (001) et ($00\bar{1}$) des deux pôles p, (100) et ($\bar{1}00$) des deux pôles h^1 et, g^1 correspondant à (010), on marque ($10\bar{1}$) et ($\bar{1}01$) aux deux pôles a^1.

Si maintenant, en se servant de ces indices, on applique la formule des zones, on reconnaît les faits suivants (fig. 246), d'ailleurs faciles à vérifier d'une manière directe :

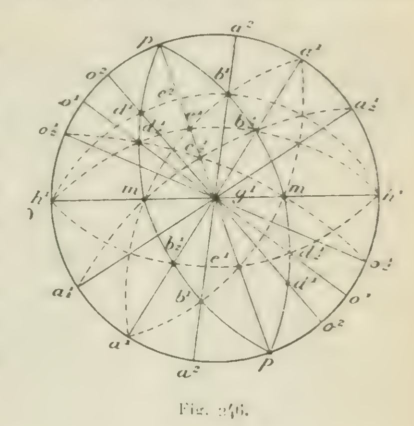


Fig. 246.

Les cercles a^1m et pm fixent b^1, c'est-à-dire (112), par leur rencontre commune, tandis que pm donne $b^{\frac{1}{2}}$ sur le diamètre a^1g^1 et que a^1m donne e^1 sur pg^1. Après quoi b^1h^1 fixe d^1 et e^2, pendant que e^1h^1 donne $d^{\frac{1}{2}}$ et que $mb^{\frac{1}{2}}$ aboutit à $a^{\frac{1}{2}}$, $md^{\frac{1}{2}}$ non adjacent à $o^{\frac{1}{2}}$ et $e^{\frac{1}{2}}$. En outre, $g^1d^{\frac{1}{2}}$ aboutit à o^1, g^1d^1 à o^2 et g^1b^1 à a^2, etc.

Les axes du système monoclinique sont : 1° la clinodiagonale a ; 2° l'orthodiagonale, prise pour unité ; 3° la longueur c de l'arête prismatique.

L'angle plan δ de la base rhombe est évidemment donné par la formule $tg\,\frac{1}{2}\,\delta = \frac{1}{a}$. De plus, on verrait aisément qu'entre l'angle mm des deux faces prismatiques (mesuré sur h^1) et l'angle aigu de p avec h^1, il y a la relation

$$cot\,\frac{1}{2}\,mm = a.\,sin\,ph^1.$$

Quand on a déterminé a par la connaissance simultanée de mm et ph^1, on fixe c en choisissant un hémiorthodôme, qu'on note a^1 ou o^1 suivant sa position. On trouvera plus loin ce calcul.

Formes mériédriques. — La simplicité du système binaire ne comporte que deux sortes de formes mériédriques, celles qui répondent à un polyèdre holoaxe hémisymétrique, pourvu d'un seul axe binaire L^2, sans plan ni centre, et celles pour lesquelles le polyèdre moléculaire a un plan de symétrie P, sans axe ni centre.

Le premier cas, réalisé dans l'acide tartrique et ses composés, se reconnaît à la dyssymétrie des sommets, qui se présentent différemment à l'observateur, suivant qu'il s'agit de la forme droite ou de la forme gauche. Ce genre d'hémiédrie n'affecte pas les formes $\{ qos \}$, parallèles à l'axe binaire.

Quant au second cas, il n'y en a pas d'exemple connu.

§ 3

SYSTÈME ASYMÉTRIQUE OU TRICLINIQUE

Notation. — Le système triclinique, ainsi nommé (1) parce que les trois arêtes de son parallélépipède générateur sont inclinées les unes sur les autres, n'a d'autre élément de symétrie qu'un centre C. A toute face (*qrs*) correspond sa parallèle ($\bar{q}\bar{r}\bar{s}$), et ces deux faces constituent la forme entière.

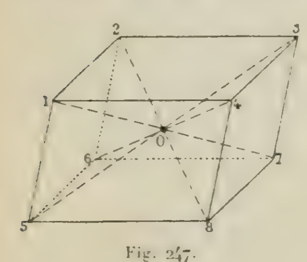


Fig. 247.

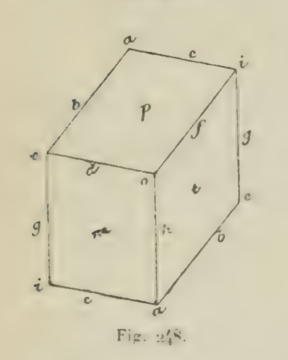


Fig. 248.

Le noyau parallélépipédique a pour faces de simples parallélogrammes (fig. 247) et ses diagonales 1. 7, 2. 8, 3. 5 et 4. 6 viennent toutes se croiser au même point O, qui est le centre.

Parmi les formes cristallines de la substance considérée, on en choisit une, de nature prismatique, plus développée ou plus fréquente que les autres, pour définir le parallélépipède générateur. La base de ce prisme est notée *p* (fig. 248), tandis que les faces dont l'intersection définit la hauteur s'appellent *m* et *t*.

On dispose ordinairement le prisme de manière que l'angle dièdre obtus des faces *m* et *t* soit placé devant l'observateur, vers lequel incline la courte diagonale de la base ou *brachydiagonale*.

Dans cette position, l'observateur voyant, aux extrémités de cette diagonale, d'abord l'angle *o*, puis l'angle *a*, on donne la notation *e* à l'angle latéral de gauche, celui de droite s'appelant *i*. L'arête de *a* en *e* est notée *b*, celle de *a* en *i*, *c*, tandis que *d* désigne *oe* et *f* l'arête *oi*. Enfin les arêtes prismatiques aboutissant en *o* et *a* sont notées *h*, et celles aboutissant en *i* sont appelées *g*.

Formes simples. — Cela posé, toute modification, se réduisant à deux faces parallèles, c'est-à-dire à la moitié d'un prisme, forme, par cela même, le quart d'une pyramide octaédrique et mérite le nom de *quartoctaèdre* ou *quartopyramide*. Suivant que les facettes déterminantes s'inclinent dans le sens de la courte diagonale ou dans le sens de l'autre, on a des *quartobrachypyramides* ou des *quartomacropyramides*. Si les facettes sont parallèles aux arêtes de la base, la forme devient une *protoquartopyramide*.

Il est aisé de voir que, si l'on prend pour axes les deux diagonales de la base et l'arête du prisme primitif, on a les notations suivantes :

(1) On lui donne aussi quelquefois les noms de système *clinoédrique*, de système *anorthique*, enfin de système du *prisme doublement oblique*.

Protoquartopyramide droite. . . . . $f^{\frac{s}{2q}}$

» gauche . . . . $d^{\frac{s}{2q}}$

» droite inférieure . . . . $b^{\frac{s}{2q}}$

» gauche » . . . . $c^{\frac{s}{2q}}$

Protoquartopyramides fondamentales. . . . . $(f^{\frac{1}{2}}, d^{\frac{1}{2}}, b^{\frac{1}{2}}, c^{\frac{1}{2}}$

Quartomacropyramide supérieure droite . . . $(f^{\frac{1}{q+r}} d^{\frac{1}{r-q}} h^{\frac{1}{s}})$

» » gauche. . . $(d^{\frac{1}{q-r}} f^{\frac{1}{q+r}} h^{\frac{1}{s}})$

» inférieure droite. . . . $(b^{\frac{1}{q+r}} c^{\frac{1}{r-q}} h^{\frac{1}{s}})$

» » gauche . . . $(c^{\frac{1}{r-q}} b^{\frac{1}{q+r}} h^{\frac{1}{s}}$

Quartobrachypyramide supérieure droite . . . $(f^{\frac{1}{q-r}} c^{\frac{1}{q-r}} g^{\frac{1}{s}})$

» » gauche. . . $(d^{\frac{1}{q-r}} b^{\frac{1}{q-r}} g^{\frac{1}{s}})$

» inférieure droite . . . $(b^{\frac{1}{q-r}} d^{\frac{1}{q-r}} g^{\frac{1}{s}})$

» » gauche. . . $(c^{\frac{1}{r-q}} f^{\frac{1}{q+r}} g^{\frac{1}{s}})$

Les troncatures parallèles aux diagonales de la base portent le nom générique d'*hémidômes* et l'on distingue :

Hémimacrodôme supérieur en avant. . . . . $o^{\frac{s}{q}}$

» inférieur » . . . . $a^{\frac{s}{q}}$

Hémibrachydôme supérieur gauche . . . . $e^{\frac{s}{q}}$

» » droit . . . . $i^{\frac{s}{q}}$

Les troncatures parallèles aux arêtes prismatiques forment des *hémiprismes*, et l'on a :

Hémimacroprisme droit. $h^{\frac{q+r}{q-r}}$

» gauche. ${}^{\frac{q+r}{q-r}}h$

Hémibrachyprisme droit. $g^{\frac{q+r}{r-q}}$

» gauche. ${}^{\frac{q+r}{r-q}}g$

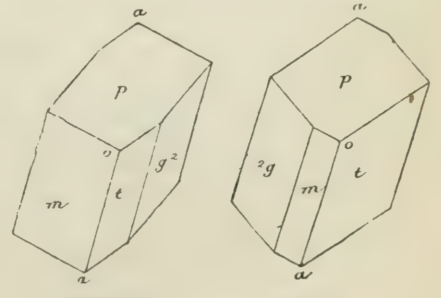


Fig. 249. Fig. 250.

Enfin la forme g^1 prend le nom de *brachypinacoïde*, h^1 étant le *macropinacoïde*. Les figures 249 et 250 indiquent la position des deux formes g^2 et ^2g relativement au parallélépipède fondamental.

Perspective stéréographique. — L'absence de tout plan de symétrie

rend absolument arbitraire le choix du plan de perspective pour la représentation du système triclinique. Mais il est naturel de se décider en faveur d'un plan contenant les pôles de plusieurs formes simples, et c'est ce qu'on fait en choisissant pour cercle fondamental, soit le cercle de la zone *mt*, soit celui de la zone *pm*. Supposons qu'on ait adopté la première solution.

Après avoir placé sur le cercle (fig. 251) les deux pôles *m* et *t* d'après la connaissance de l'angle du prisme, on détermine, dans l'intérieur, la position du pôle *p*, ce qui fixe les deux cercles de zone *mp*, *tp*. La forme générale du parallélépipède étant ainsi établie, la connaissance de deux autres faces est encore nécessaire pour définir les valeurs relatives des paramètres. Soit g^1 la notation admise pour une de ces faces, connue par les angles pg^1 et mg^1, par exemple ; il ne reste plus qu'à connaître une face telle que a^1. Ce dernier pôle une fois choisi, on sait que les pôles *b*

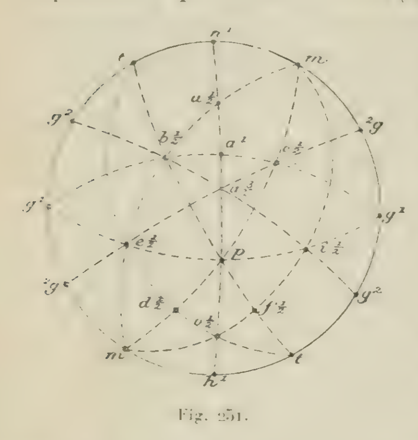


Fig. 251.

doivent se trouver entre *t* et *p*, sur la plus longue portion de l'arc *tp*, puisque les faces correspondantes sont tangentes au dièdre aigu de *p* sur *t*. La plus petite portion du même arc donne les pôles *f*, tandis que les pôles *c* et *d* se disposent de même sur *pm*.

L'arc $g^1 a^1$ fixe $b\frac{1}{2}$ et $c\frac{1}{2}$, tandis que $g^1 p$, qui doit contenir, d'une part les pôles *e*, de l'autre les pôles *i*, fixe $e\frac{1}{2}$ par son intersection avec $mb\frac{1}{2}$ et $i\frac{1}{2}$ par son intersection avec $mf\frac{1}{2}$. D'ailleurs, pa^1 donne les deux pôles h^1 et le cercle ph^1 coupe $mb\frac{1}{2}$ en $a\frac{1}{2}$ et $mf\frac{1}{2}$ en $o\frac{1}{2}$. En outre, le cercle $b\frac{1}{2}\ i\frac{1}{2}$ donne les pôles g^2, et le cercle $e\frac{1}{2}\ c\frac{1}{2}$ les pôles ${}^2g$.

CHAPITRE VII

PRINCIPE DES MESURES ET DES CALCULS CRISTALLOGRAPHIQUES

§ 1

MESURES GONIOMÉTRIQUES

Goniomètre d'application. — La mesure des angles des cristaux s'effectue à l'aide d'instruments appropriés, qui portent le nom de *goniomètres*.

Le plus simple est le *goniomètre d'application*, inventé au XVIIIe siècle par Carangeot. Cet instrument se compose de deux alidades métalliques, mobiles autour d'un centre commun. On applique chacune de ces alidades sur l'une des faces de l'angle à mesurer, en ayant soin que l'arête du dièdre touche l'intersection des alidades en restant normale au plan de ces dernières. Ce résultat une fois obtenu, on fixe l'ouverture des branches en serrant une virole et l'on applique le goniomètre sur un rapporteur, habituellement métallique, qui fait connaître la valeur de l'angle.

Deux rainures correspondantes, pratiquées à la base des alidades, permettent de faire varier la position de la rencontre de leurs arêtes, en la rapprochant autant que l'on veut des extrémités libres des branches. De cette manière, la mesure goniométrique peut être appliquée même à des cristaux très petits et en partie engagés dans la gangue.

Malgré son extrême simplicité, le goniomètre d'application a suffi aux mesures remarquablement précises d'Haüy. Mais aujourd'hui cet instrument n'est plus guère employé que pour les cristaux dont les faces ne sont pas assez polies pour réfléchir la lumière. Pour tous les autres, on a recours au *goniomètre à réflexion*.

Goniomètre à réflexion. — Le principe du goniomètre à réflexion est aussi simple que le maniement en est relativement facile.

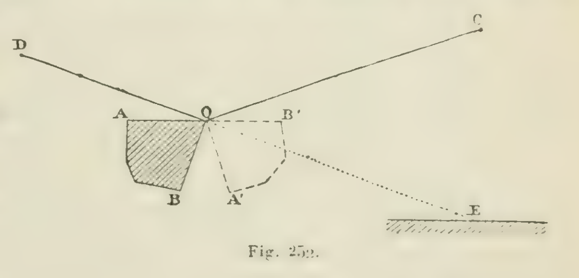


Fig. 252.

Soit AOB (fig. 252) un cristal dont deux faces planes, projetées en OA et OB, se rencontrent suivant une arête rectiligne projetée en O. Un objet lumineux, situé en C, envoie sur la face OA un rayon qui, réfléchi en OD, vient pénétrer en D dans l'œil de l'observateur, supposé immobile. Ce rayon paraît venir d'un certain point E, que l'observateur peut facilement repérer en faisant coïncider le rayon visuel OE ave la ligne qui va de l'œil à un objet bien visible, placé sur la table qui porte l'instrument. Cet objet peut être l'angle d'une carte de couleur blanche ou, mieux encore, l'image de C, réfléchie, non sur le cristal, mais sur un miroir adapté au pied du goniomètre et pouvant tourner autour d'un axe parallèle à celui de l'instrument. Ce repérage une fois obtenu, si l'on fait tourner le cristal autour de l'arête O, jusqu'à ce que la face OB soit venue en OB', sur le prolongement de OA, le rayon COD continuera à suivre la même voie, et l'image de C, réfléchie cette fois par la face OB, viendra coïncider avec celle que fournissait antérieurement la face OA. Or, à ce moment, le cristal aura tourné d'un angle BOB' égal au supplément de AOB, c'est-à-dire de l'angle à mesurer.

Il suffit donc que le cristal soit fixé à l'extrémité d'une tige, qui elle-même soit implantée normalement au centre d'un limbe gradué. Les détails de l'agencement doivent être tels, qu'une série de mouvements simples permette d'établir une coïncidence rigoureuse entre l'arête O et l'axe de rotation de l'appareil, lequel axe peut d'ailleurs être disposé horizontalement ou verticalement.

On trouvera dans divers auteurs, et notamment dans l'ouvrage de Mallard, une description détaillée des divers goniomètres, ainsi qu'une discussion de l'influence que peuvent exercer les causes d'erreur provenant, soit d'un changement dans la position de l'œil, soit d'un défaut de coïncidence absolue entre l'arête du dièdre et l'axe de rotation. Nous nous bornerons à dire ici quelques mots sur le fonctionnement du goniomètre de Wollaston, le plus habituellement employé par les commençants.

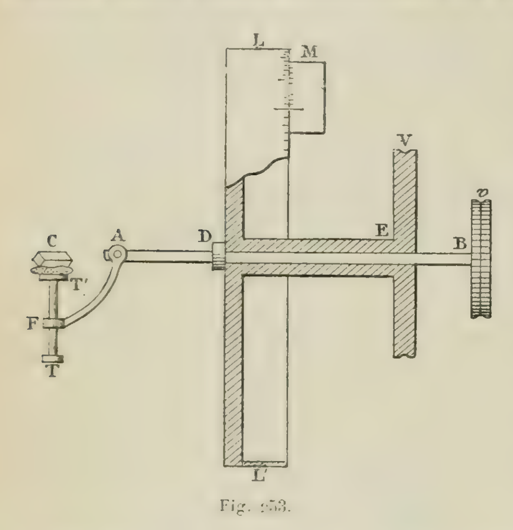


Fig. 253.

Sur un pied, muni de vis calantes, est porté un arbre horizontal DE (fig. 253), faisant corps avec un limbe gradué LL', dont les divisions se déplacent devant un vernier M. L'arbre DE est percé en son milieu et laisse passer une tige métallique AB, qui peut y tourner sans l'entraîner. A l'extrémité A de cette tige est articulé un levier AF, qui peut tourner autour de A et se termine en F par un collier, dans lequel glisse à frottement doux une tige TT'. Au bout T' de cette tige est une petite plate-forme circulaire, sur laquelle on fixe le cristal C à l'aide d'un peu de cire, de telle sorte que l'arête du dièdre à mesurer soit, à la fois, perpendiculaire à la petite tige, passant par le prolongement de celle-ci et faisant suite à l'axe horizontal du limbe (1).

Il s'agit alors de vérifier la position du cristal. On choisit comme mire, sur la table, une ligne horizontale, sensiblement parallèle à l'axe du limbe, et on place l'œil de telle sorte que l'arête du dièdre et la ligne de mire soient vues en coïncidence. Cela fait, à l'aide de la petite virole v, on fait tourner le cristal alternativement dans les deux sens. Si la coïncidence persiste, le réglage provisoire est bon. Sinon, on peut le corriger en utilisant les deux remarques suivantes :

(1) Le moyen le plus pratique consiste à appliquer, sur le limbe gradué, une carte dont le bord masque exactement l'axe et à amener l'arête sur le plan qui contient l'œil et le bord de la carte. Ensuite, plaçant l'œil dans le prolongement de ce dernier, on s'assure que l'arête cristalline a la position voulue.

1° Un déplacement de l'arête parallèlement à la mire indique que l'arête est bien parallèle à l'axe, mais ne coïncide pas avec lui. Il faut donc enfoncer ou retirer la tige TT'. Il convient d'observer l'arête en masquant, avec une feuille de papier, la face du cristal, dont le miroitement pourrait gêner.

2° Un déplacement oblique relativement à la mire prouve que l'arête n'est pas parallèle à l'axe. On corrige ce défaut en faisant tourner le cristal, soit à l'aide de la petite tige, soit en manœuvrant l'articulation coudée AF.

Après ces opérations, on procède au réglage définitif. Une mire, ordinairement formée d'une lumière (par exemple d'une bougie), est placée à quelques mètres en avant du goniomètre et un peu plus haut que l'instrument. Le plan du limbe est disposé de telle sorte que le point lumineux s'y trouve contenu, les viroles occupant la droite de l'observateur. L'œil étant à quelques centimètres de l'axe, on s'arrange de façon à ce que l'image du point lumineux, aperçue dans le miroir placé au pied du goniomètre, soit vue en coïncidence avec l'arête cristalline. Puis, *sans changer la position de l'œil*, on fait tourner le cristal, en maniant la virole intérieure c, jusqu'à ce qu'on aperçoive l'image lumineuse *réfléchie par une des faces du dièdre*. On cherche à amener cette seconde image en coïncidence avec la première ou, au moins, avec la ligne, parallèle à l'axe, qui passe par cette première image, auquel cas il suffit d'un léger déplacement du miroir pour obtenir la coïncidence rigoureuse.

On tourne ensuite le cristal, toujours par la virole intérieure, de manière à voir l'image réfléchie par la seconde face. Si la coïncidence a encore lieu, le réglage définitif est bon. Sinon, il faut modifier la position, par simple rotation de la petite tige, de telle sorte que l'écart entre les deux images soit réduit de moitié, puis agir sur le miroir pour obtenir la coïncidence. On répète la même série d'opérations, successivement pour les deux faces du dièdre, jusqu'à ce que le réglage ne laisse plus rien à désirer.

Après le réglage vient la mesure de l'angle. On place le vernier au zéro et on serre la vis de pression. Ensuite, à l'aide de la virole intérieure, on établit la coïncidence entre l'image vue dans le miroir et celle qui est réfléchie par la première face du dièdre (celle qui est le plus rapprochée de l'observateur). Alors on desserre la vis de pression et, à l'aide de la grande virole V, on amène à la coïncidence l'image de la seconde face. L'angle dont le cercle a tourné est le supplément de l'angle dièdre cherché. Or la division du limbe a été faite de telle sorte qu'on y puisse lire directement les suppléments des angles de rotation. La détermination de l'angle vrai n'exige donc aucun calcul.

Nous rappellerons ici le précieux secours que le goniomètre apporte aux minéralogistes, en leur permettant de reconnaître du premier coup toutes celles des faces d'un cristal qui font partie de la même zone. Cette constatation simplifie les mesures et parfois même les rend inutiles, lorsque la face examinée se trouve faire partie à la fois de deux zones dont les symboles

soient déjà connus, en sorte que le symbole de cette face se détermine par un calcul très simple.

Avec des cristaux de petites dimensions, surtout quand les faces sont peu réfléchissantes, l'emploi d'une mire lumineuse lointaine fait que les images sont souvent peu nettes. Mallard y a remédié en donnant, au goniomètre de Wollaston, une disposition nouvelle. Une fente lumineuse, située tout près de l'appareil, envoie, sur le cristal comme sur la mire, des rayons qui, reçus au préalable par un collimateur, sont dans les mêmes conditions que s'ils venaient de l'infini, tout en offrant une grande intensité (1).

Cristaux microscopiques. — Entre les mains d'un observateur habile, le goniomètre de Wollaston, surtout avec la modification introduite par Mallard, permet de mesurer les angles de très petits cristaux, tels que des parcelles de clivage. Mais on a réussi à adapter au microscope des dispositions qui permettent d'étendre les mesures goniométriques à des fragments encore plus petits. La plus ingénieuse de ces dispositions est celle qui a été imaginée par M. E. Bertrand (2). Nous n'en indiquerons ici que le principe. Supposons qu'une roche ait été écrasée au marteau et que, dans sa poussière, on ait réussi à enlever, avec la pointe d'un morceau de cire molle et en s'aidant d'une loupe, une esquille cristalline, offrant deux directions de facettes. On pose la cire avec l'esquille sur une des faces d'un petit cube de cristal parfaitement dressé. Cela posé, il est évident que, si l'on avait un moyen simple de préciser la position des faces de l'esquille relativement à celles du cube, une formule de trigonométrie suffirait à faire connaître l'angle de leurs normales.

Voici comment on parvient à ce résultat : on dispose le cube sur le porte-objet d'un microscope, au-devant duquel est placée une fente verticale lumineuse. Le plan lumineux, c'est-à-dire passant par la fente et l'axe optique du microscope, a une direction parfaitement déterminée, que l'on peut faire coïncider avec celle d'une des faces du cube et, en même temps, avec le zéro de la graduation de la plaque rotative du porte-objet. On fait alors tourner cette plaque jusqu'à ce que l'œil, placée à l'oculaire du microscope, reçoive l'image lumineuse réfléchie par une des facettes de l'esquille cristalline.

A ce moment, le plan passant par l'axe optique du microscope et la normale à la facette coïncide en direction avec le plan lumineux et, d'après la rotation effectuée, il est aisé de repérer son orientation relativement à l'arête cubique choisie pour fixer la direction. En posant le cube sur une autre face et en répétant la même expérience, on obtiendra une seconde donnée qui, jointe à la première, fixera la position de la facette.

En munissant le microscope d'appareils destinés à faciliter l'appréciation du maximum d'éclairement, M. Bertrand a pu réussir à mesurer, avec ce pro-

(1) Voir la description de l'appareil dans le *Bulletin de la Soc. franç. de Minéralogie*, 1888.
(2) On en trouvera la description complète dans le *Traité* de Mallard.

cedé, à 6 ou 7 minutes près, les angles de cristaux n'ayant guère qu'un centième de millimètre de diamètre.

§ 2

PRINCIPE DES CALCULS CRISTALLOGRAPHIQUES

Définition du problème cristallographique. — Le problème cristallographique a pour objet le plus habituel la détermination de la forme cristalline simple à laquelle appartient une face faisant partie d'un cristal donné. Il faut pour cela que les éléments fondamentaux de la forme primitive de l'espèce soient connus, ou par eux-mêmes, ou à l'aide d'éléments dérivés, d'où il soit facile de les déduire. Alors, ayant fixé la position de la face, ou plutôt sa direction, d'après les angles qu'elle fait avec deux faces de notation connue, il s'agit d'obtenir, avec ces données, la notation de la forme correspondante.

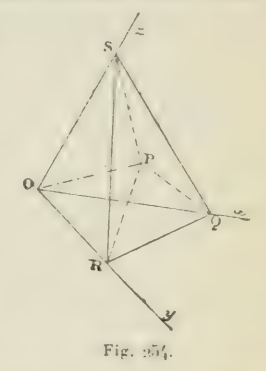


Fig. 254.

Or nous savons que la notation de la face déterminante d'une forme s'établit à l'aide de trois quantités, respectivement proportionnelles aux longueurs que cette face intercepte sur trois axes conjugués. Supposons donc que, par le centre de la sphère, sur laquelle nous avons coutume de rapporter les éléments des formes cristallines, on mène (fig. 254) trois lignes Ox, Oy, Oz, respectivement parallèles aux trois axes en question. Soit QRS une face quelconque. Du centre O, abaissons OP perpendiculaire sur QRS et joignons PQ, PR, PS.

On a, dans les triangles rectangles OPQ, OPR, OPS :

$$OP = OQ \cos POx = OR \cos POy = OS \cos POz.$$

Donc

$$\frac{OQ}{\dfrac{1}{\cos POx}} = \frac{OR}{\dfrac{1}{\cos POy}} = \frac{OS}{\dfrac{1}{\cos POz}}.$$

Ainsi les longueurs interceptées, par une face quelconque, sur les trois axes cristallographiques, sont respectivement proportionnelles aux inverses des cosinus des angles que la normale à cette face fait avec les axes conjugués. Ces angles ont d'ailleurs pour mesures les arcs de grands cercles compris entre le pôle de la face QRS et les points où les trois axes rencontrent la sphère.

Les longueurs OQ, OR et OS sont celles que nous avons constamment désignées par $\frac{1}{q}.a$, $\frac{1}{r}.b$, $\frac{1}{s}.c$, a, b et c étant les paramètres des trois axes. On a

donc

$$\frac{\frac{a}{q}}{\frac{1}{\cos \mathrm{PO}x}} = \frac{\frac{b}{r}}{\frac{1}{\cos \mathrm{PO}y}} = \frac{\frac{c}{s}}{\frac{1}{\cos \mathrm{PO}z}},$$

d'où l'on tire, si l'on veut,

$$\frac{\cos \mathrm{PO}x}{\cos \mathrm{PO}z} = \frac{c}{a}.\frac{q}{s} \quad \frac{\cos \mathrm{PO}y}{\cos \mathrm{PO}z} = \frac{c}{b}.\frac{r}{s} \quad \frac{\cos \mathrm{PO}x}{\cos \mathrm{PO}y} = \frac{b}{a}.\frac{q}{r}.$$

Ainsi la solution du problème cristallographique revient à la recherche des arcs de grands cercles, compris entre le pôle d'une face et les points où la sphère est percée par des parallèles aux axes.

Cela posé, concevons, dans le cas le plus général (fig. 255), que la forme primitive d'un système soit représentée par les trois pôles p, m, t, des faces de son parallélépipède générateur. Si, par le centre de la sphère, nous menons Ox, Oy, Oz, parallèles aux axes conjugués, supposés concordants avec les arêtes de ce parallélépipède, les lignes en question perceront la sphère en des points X, Y, Z, dont chacun sera à 90 degrés de deux des pôles p, m, t. En effet, la ligne Op, perpendiculaire à la face p, est perpendiculaire à la fois aux arêtes OX et OY, qui sont contenues dans le plan de p. Le pôle p doit donc être à 90 degrés des points X et Y. De même, le pôle m sera à 90 degrés des points X et Z, si OX est l'intersection de p avec m.

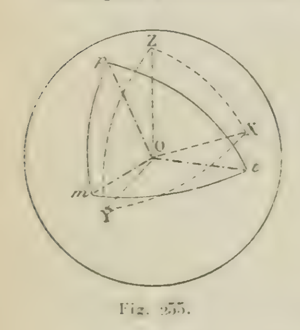


Fig. 255.

En résumé le triangle sphérique XYZ, formé par les normales aux faces du triangle sphérique pmt, est *polaire* de ce dernier. Ses angles plans sont donc égaux aux suppléments des angles dièdres de pmt et réciproquement. Par conséquent on a, pour la valeur des dièdres X, Y, Z, p, m, t des deux triangles :

$$\mathrm{X} = 180° - mp \qquad \mathrm{Y} = 180° - tp \qquad \mathrm{Z} = 180° - mt$$
$$p = 180° - \mathrm{XY} \qquad m = 180° - \mathrm{XZ} \qquad t = 180° - \mathrm{YZ}.$$

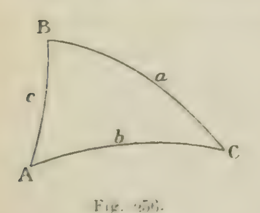


Fig. 256.

Formules usuelles. — D'après ce qui vient d'être établi, on devra, dans chaque cas particulier, fixer la position des points X, Y et Z et, ce résultat obtenu, déterminer, par des résolutions de triangles sphériques, les cosinus de leurs distances angulaires au pôle dont on veut connaître la notation.

Lorsque les triangles sphériques sont obliquangles, si l'on appelle A, B, C les angles dièdres et a, b, c les côtés (fig. 256), on a :

(1) $$\cos a = \cos b . \cos c + \sin b . \sin c . \cos A.$$

(2) $$\frac{\sin a}{\sin A} = \frac{\sin b}{\sin B} = \frac{\sin c}{\sin C}.$$

(3) $$\cot b . \sin c = \cos c . \cos A + \sin A . \cot B.$$

(4) $$\cos A = - \cos B . \cos C + \sin B . \sin C . \cos a.$$

Les formules se simplifient beaucoup dans le cas, fréquemment réalisé, de triangles sphériques rectangles. Une règle mnémonique fort simple permet alors d'écrire très facilement les équations dont on a besoin. Il suffit de remplacer (fig. 257) les notations b et c des côtés de l'angle droit par $\frac{\pi}{2} - b$ et $\frac{\pi}{2} - c$. Cela posé, si l'on fait abstraction de l'angle droit A, de telle sorte que les éléments, angles et côtés, se succèdent dans l'ordre suivant :

$$a, B, \left(\frac{\pi}{2} - c\right), \left(\frac{\pi}{2} - b\right), C,$$

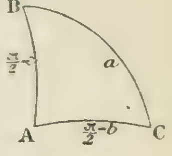


Fig. 257.

en tournant, C étant regardé comme contigu à la fois à a et à $\left(\frac{\pi}{2} - b\right)$, on peut dire que *le cosinus d'un élément est égal au produit des sinus des éléments opposés et au produit des cotangentes des éléments adjacents*.

Ainsi, les éléments opposés à C étant $\left(\frac{\pi}{2} - c\right)$ et B, on a

$$\cos C = \sin \left(\frac{\pi}{2} - c\right) \times \sin B = \cos c . \sin B,$$

et, $\left(\frac{\pi}{2} - c\right)$ étant adjacent à B et à $\left(\frac{\pi}{2} - b\right)$,

$$\cos \left(\frac{\pi}{2} - c\right) = \cot B . \cot \left(\frac{\pi}{2} - b\right)$$

ou

$$\sin c = \cot B . \operatorname{tg} b.$$

Formules immédiatement calculables par logarithmes. — Afin de faciliter les opérations qu'on pourrait avoir à faire pour résoudre des triangles sphériques quelconques, nous donnerons le tableau des diverses formules, applicables à tous les cas et rendues immédiatement calculables par logarithmes (1).

(1) Ce tableau est extrait de C. Klein, *Einleitung in die Krystallberechnung*, 1876, pp. 4, 5, 6.

ÉLÉMENTS DONNÉS	ÉLÉMENTS à DÉTERMINER	FORMULES
a, b, c	A	$\sin \frac{1}{2} A = \sqrt{\frac{\sin \frac{1}{2}(a+b-c) . \sin \frac{1}{2}(a+c-b)}{\sin b . \sin c}}$ $\cos \frac{1}{2} A = \sqrt{\frac{\sin \frac{1}{2}(a+b+c) . \sin \frac{1}{2}(b+c-a)}{\sin b . \sin c}}$
A, b, c	a	$\cos a = \frac{\cos b . \sin (c+\varphi)}{\sin \varphi}$ avec $\cot \varphi = tg\, b . \cos A$
	B	$\cot B = -\frac{\cot A . \cos (c+\varphi)}{\cos \varphi}$ avec $\cot \varphi = tg\, b . \cos A$
	C	$\cot C = -\frac{\cot A . \cos (b+\varphi)}{\cos \varphi}$ avec $\cot \varphi = tg\, c . \cos A$
a, b, A ($\sin a > \sin b$)	B	$\sin B = \frac{\sin A . \sin b}{\sin a}$ si b est > ou < 90°, de même B > ou < 90°
	c	$\sin (c+\varphi) = \frac{\cos a}{\cos b} . \sin \varphi$ avec $\cot \varphi = tg\, b . \cos A$
	C	$\sin (C+\varphi) = \cot a . tg\, b . \sin \varphi$ avec $tg\, \varphi = \cos b . tg\, A$
B, C, c ($\sin C > \sin B$)	b	$\sin b = \frac{\sin B . \sin c}{\sin C}$ si B > ou < 90°, de même b > ou < 90°

ÉLÉMENTS CONNUS	ÉLÉMENTS À DÉTERMINER	FORMULES
B, C, c ($\sin C > \sin B$) (*Suite*)	a	$\cos(a + \varphi) = -\cot C . \operatorname{tg} B . \cos \varphi$ avec $\cot \varphi = \operatorname{tg} c . \cos B$
	A	$\sin(A - \varphi) = \dfrac{\cos C . \sin \varphi}{\cos B}$ avec $\cot \varphi = \operatorname{tg} B . \cos c$
B, C, a	A	$\cos A = \dfrac{\cos B . \sin(C - \varphi)}{\sin \varphi}$ avec $\cot \varphi = \operatorname{tg} B . \cos a$
	b	$\cot b = \dfrac{\cot a . \sin(C + \varphi)}{\sin \varphi}$ avec $\operatorname{tg} \varphi = \cos a . \operatorname{tg} B$
	c	$\cot c = \dfrac{\cot a . \sin(B + \varphi)}{\sin \varphi}$ avec $\operatorname{tg} \varphi = \cos a . \operatorname{tg} C$
A, B, C	a	$\sin \frac{1}{2} a = \sqrt{\dfrac{-\cos \frac{1}{2}(A + B + C) . \cos \frac{1}{2}(B + C - A)}{\sin B . \sin C}}$ $\cos \frac{1}{2} a = \sqrt{\dfrac{\cos \frac{1}{2}(A + B - C) . \cos \frac{1}{2}(A + C - B)}{\sin B . \sin C}}$

Ajoutons à cela les équations de Delambre, parfois désignées sous le nom d'équations de Gauss, et dont chacune renferme les six éléments d'un triangle sphérique :

(1) $$\sin \frac{1}{2}(A + B) . \cos \frac{c}{2} = \cos \frac{C}{2} . \cos \frac{1}{2}(a - b)$$

(2) $$\cos \frac{1}{2}(A + B) . \cos \frac{c}{2} = \sin \frac{C}{2} . \cos \frac{1}{2}(a + b)$$

(3) $$\sin \frac{1}{2}(A - B) . \sin \frac{c}{2} = \cos \frac{C}{2} . \sin \frac{1}{2}(a - b)$$

$$(4) \qquad \cos \frac{1}{2}(A - B) \cdot \sin \frac{c}{2} = \sin \frac{C}{2} \cdot \sin \frac{1}{2}(a + b)$$

Ces équations, divisées deux à deux, fournissent les équations ou *analogies* de Néper.

$$(1) \qquad tg \frac{1}{2}(a + b) = tg \frac{c}{2} \cdot \frac{\cos \frac{1}{2}(A - B)}{\cos \frac{1}{2}(A + B)}$$

$$tg \frac{1}{2}(a - b) = tg \frac{c}{2} \cdot \frac{\sin \frac{1}{2}(A - B)}{\sin \frac{1}{2}(A + B)}$$

$$(2) \qquad tg \frac{1}{2}(A + B) = \cot \frac{C}{2} \cdot \frac{\cos \frac{1}{2}(a - b)}{\cos \frac{1}{2}(a + b)}$$

$$tg \frac{1}{2}(A - B) = \cot \frac{C}{2} \cdot \frac{\sin \frac{1}{2}(a - b)}{\sin \frac{1}{2}(a + b)}$$

Formule générale de l'angle de deux faces. — Soient (qrs) et $(q'\,r'\,s')$ les symboles de deux faces observées sur un cristal dont les axes ont pour paramètres a, b, c et font entre eux des angles respectivement égaux à ξ, η, ζ, ξ étant l'angle des axes b et c, η celui des axes a et c, ζ celui des axes a et b.

On peut démontrer que l'angle dièdre δ, formé par la rencontre des deux faces (qrs), $(q'\,r'\,s')$, est lié aux symboles des deux faces et à la valeur des éléments cristallographiques du système par la relation suivante (1) :

$$tang\, \delta = \frac{1}{K} \sqrt{(\sin^2 \xi + \sin^2 \eta + \sin^2 \zeta + 2 \cos \xi \cos \eta \cos \zeta - 1)\, L}$$

dans laquelle on a :

$$L = \left(\frac{rs' - sr'}{bc}\right)^2 + \left(\frac{sq' - qs'}{ab}\right)^2 + \left(\frac{qr' - rq'}{ab}\right)^2$$
$$+ 2\left(\frac{sq' - qs'}{ca}\right)\left(\frac{qr' - rq'}{ab}\right)\cos \xi + 2\left(\frac{qr' - rq'}{ab}\right)\left(\frac{rs' - sr'}{bc}\right)\cos \eta$$
$$+ 2\left(\frac{rs' - sr'}{bc}\right)\left(\frac{sq' - qs'}{ca}\right)\cos \zeta$$

$$K = \frac{qq'}{a^2}\sin^2 \xi + \frac{rr'}{b^2}\sin^2 \eta + \frac{ss'}{c^2}\sin^2 \zeta + \frac{rs' + sr'}{bc}(\cos \eta \,.\, \cos \zeta - \cos \xi)$$
$$+ \frac{sq' + qs'}{ca}(\cos \zeta \,.\, \cos \xi - \cos \eta) + \frac{qr' + rq'}{ab}(\cos \xi \,.\, \cos \eta - \cos \zeta).$$

(1) Voir von Lang, *Lehrbuch der Krystallographie* (1866), p. 309.

Cette formule peut sembler très compliquée ; mais elle ne garde toute sa complication que pour le système triclinique et elle se simplifie considérablement dans le cas des systèmes à axes rectangulaires ; car alors les trois cosinus sont égaux à zéro. En tout cas, et dût-on recourir, pour la résolution des équations, à des méthodes approximatives, on possède ainsi un moyen théorique de déterminer le symbole (qrs) d'une face si, connaissant tous les éléments cristallographiques de l'espèce, on a mesuré les angles δ et δ' que fait cette face avec deux autres $(q'r's')$, $(q''r''s'')$, de symboles connus. En effet, cela donne, entre les quantités q, r et s, deux équations qui doivent théoriquement permettre de déterminer leurs rapports mutuels, ce qui suffit à l'expression du symbole.

Inversement, si l'on supposait connus les symboles de dix faces cristallines et leurs angles mutuels, on aurait cinq équations qui, théoriquement, permettraient de déterminer les trois angles ξ, η, ζ, ainsi que les rapports $\frac{a}{b}$ et $\frac{c}{b}$.

Formules des faces tautozonales. — Soient quatre faces *tautozonales*, c'est-à-dire faisant partie d'une même zone, et dont nous désignerons les pôles par P, P′, P″, P‴.

Supposons que l'on connaisse les symboles des trois premières faces (qrs), $(q'r's')$, $(q''r''s'')$, ainsi que les angles PP′, PP″, PP‴, respectivement formés par les normales aux faces et comptés suivant la même direction.

Cherchons un nombre *rationnel* n, qui satisfasse aussi exactement que possible à l'équation

$$n = \left[\frac{q''r - r''q}{q''r' - r''q'}\right] \cdot \frac{\sin(\mathrm{PP}''' - \mathrm{PP}')}{\sin(\mathrm{PP}''' - \mathrm{PP}'')} \cdot \frac{\sin \mathrm{PP}'''}{\sin \mathrm{PP}''}.$$

Dans ce cas, les caractéristiques q''', r''', s''' de la quatrième face P‴ seront données par les équations (1) :

$$q''' = \pm (q - q'n), \qquad r''' = \pm (r - r'n), \qquad s''' = \pm (s - s'n).$$

Le choix entre les signes + et — devra être fait d'après la position des faces données.

Supposons maintenant que les quatre symboles soient connus, ainsi que les distances angulaires PP′ et PP″, et qu'il s'agisse de déterminer PP‴.

Si l'on pose

$$tg\,\delta = \left(\frac{q''r = r''q}{q''r' - r''q'}\right)\left(\frac{q'''r - r'''q}{q'''r' - r'''q'}\right) \cdot \frac{\sin(\mathrm{PP}'' - \mathrm{PP}')}{\sin \mathrm{PP}'},$$

la valeur de PP‴ sera donnée par l'équation :

$$tg\left(\mathrm{PP}''' - \frac{1}{2}\mathrm{PP}'\right) = tg\,\frac{1}{2}\mathrm{PP}' \,.\, tg\,(45^0 + \delta).$$

(1) Voir von Lang, *Lehrbugh*.

§ 3

APPLICATIONS DES FORMULES GÉNÉRALES

Objet de ces applications. — En appliquant les formules qui viennent d'être données, toute personne, tant soit peu familiarisée avec la trigonométrie sphérique et l'usage des tables de logarithmes, résoudra sans peine les divers problèmes qui peuvent se présenter en cristallographie. Cependant, pour épargner aux commençants quelques tâtonnements, nous croyons utile de présenter ici, pour chaque système, un certain nombre de types de calculs usuels, la plupart empruntés au *Traité* de Mallard. On pourra les employer, soit à la définition des indices de faces nouvelles, dont on aurait déterminé au goniomètre les relations angulaires, soit au calcul des angles dièdres qui caractérisent telle ou telle forme d'un cristal, pour lequel on connaît déjà les rapports paramétriques et les incidences mutuelles des axes. Comme, dans la description de chaque espèce, nous aurons soin de faire figurer ces dernières données, on disposera ainsi d'un moyen de savoir sous quel angle se coupent deux faces de notation déterminée, pour le cas où l'on n'aurait pas sous la main les tableaux d'incidences mutuelles, tels que ceux qui rendent si utile et si pratique le *Manuel* de Des Cloizeaux.

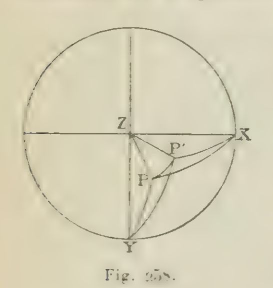


Fig. 258.

1° **Système cubique.** — Soit P (fig. 258) le pôle d'une face quelconque (qrs). Si X, Y et Z sont les pôles des trois faces cubiques les plus voisines (ou les extrémités des arêtes de cube), la face sera définie par deux des trois angles PX, PY et PZ, que sa normale fait avec les normales aux faces du cube. Supposons qu'on donne PX et PZ. Le triangle PZX, rectilatère en ZY, sera facile à résoudre et donnera

$$cos\,\mathrm{PZX} = \frac{cos\,\mathrm{PX}}{sin\,\mathrm{PZ}}.$$

Ayant PZX, on en déduira son complément PZY, ce qui permettra de calculer PY.

Or les formules générales de la page 206 deviennent, dans ce cas particulier (où $a = b = c = 1$) :

$$\frac{cos\,\mathrm{PX}}{cos\,\mathrm{PZ}} = \frac{q}{s}, \qquad \frac{cos\,\mathrm{PY}}{cos\,\mathrm{PZ}} = \frac{r}{s}, \qquad \frac{cos\,\mathrm{PX}}{cos\,\mathrm{PY}} = \frac{q}{r}.$$

Il sera donc aisé de déterminer le symbole de la face.

Les calculs inverses se feraient à l'aide des formules

$$tg\,\mathrm{PZX} = \frac{r}{q}, \qquad tg\,\mathrm{PZ} = \sqrt{\frac{q^2 + r^2}{s^2}}.$$

D'une manière générale, on peut établir que la distance angulaire de deux pôles PP', correspondant aux notations qrs, $q'r's'$, est donnée par la formule :

$$\cos \mathrm{PP'} = \frac{qq' + rr' + ss'}{\sqrt{q^2 + r^2 + s^2} \cdot \sqrt{q'^2 + r'^2 + s'^2}}.$$

2° Système hexagonal. — Soient $(qr\overline{q+r}s)$ et $(q'r'\overline{q'+r'}s')$ les symboles de deux faces, dont les pôles font entre eux un angle γ. Si a désigne le paramètre des axes horizontaux et h celui de l'axe vertical, on a (1) :

$$\cos \gamma = \frac{qq' + rr' + (q+r)(q'+r') + \frac{3}{2}\frac{a^2}{h^2}ss'}{\sqrt{\frac{3}{2}\frac{a^2}{h^2}s^2 + q^2 + r^2 + (q+r)^2} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}\frac{a^2}{h^2}s'^2 + q'^2 + r'^2 + (q'+r')^2}}.$$

Dans le cas où les deux faces sont deux faces adjacentes $(10\bar{1}1)$ et $(01\bar{1}1)$ de la protopyramide b^1, la formule devient

$$\frac{3}{2}\frac{a^2}{h^2} = \frac{2\cos\gamma - 1}{1 - \cos\gamma}.$$

Si l'on connaît les angles pb^1 ou pa^1, on se sert des formules :

$$\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{a}{h} = \cot pb^1, \qquad \frac{a}{2h} = \cot pa^1.$$

Fig. 259.

En général, si P (fig. 259) est le pôle d'une face $(qr(\overline{q+r})s)$, Zx et Zy les deux axes horizontaux, de paramètre a, Z le pôle où aboutit l'axe vertical, de paramètre h, si l'on mène les axes ZX et ZY à 30° des premiers, et qu'on détermine les angles PZ, PX, PZX, PZY, on a

$$\frac{q}{s} = \frac{a}{h}\, tg\, \mathrm{PZ} . \sin \mathrm{PZX}, \qquad \frac{r}{s} = \frac{a}{h}\, tg\, \mathrm{PZ} . \sin \mathrm{PZY}.$$

3° Système quadratique. — Soit γ l'angle de deux pôles (qrs), $(q'r's')$, on a

$$\cos \gamma = \frac{qq' + rr' + \frac{a^2}{c^2}ss'}{\sqrt{q^2 + r^2 + \frac{a^2}{c^2}s^2} \cdot \sqrt{q'^2 + r'^2 + \frac{a^2}{c^2}s'^2}}.$$

Dans le cas où les deux pôles sont symétriques l'un de l'autre par rotation de 180 degrés autour de l'axe vertical on a (2) :

$$\frac{a}{c} = \sqrt{\frac{q^2 + r^2}{s^2}} . \cot \frac{1}{2}\gamma.$$

(1) Voir Mallard, *Traité de Cristallographie*, I, p. 289.
(2) Dans ce cas les caractéristiques sont, par exemple, qrs et $\overline{qr}s$.

Si la face (qrs) est choisie pour représenter $a^1 = (101)$, on a

$$\frac{a}{c} = cot \frac{1}{2} \gamma \text{ (1)}.$$

Si c'est $b^{\frac{1}{2}} = (111)$, on a

$$\frac{a}{c} = \sqrt{2} . cot \frac{1}{2} \gamma.$$

Supposons que, dans un cristal quadratique, un protoprisme basé *pm*, combiné avec le deutéroprisme h^1, comme cela se rencontre dans l'idocrase, porte (fig. 260), sur les arêtes horizontales de la base, deux modifications tangentes, qui sont évidemment des protopyramides de Lévy et que nous désignerons provisoirement par b' et b''. Admettons en outre que l'angle *a* porte une facette symétrique, appartenant à une deutéropyramide a', et deux facettes *u*, *u*, faisant partie d'un dioctaèdre. L'observation a donné les angles suivants :

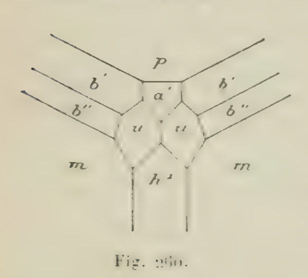


Fig. 260.

$$b'p = \alpha \qquad b''p = \beta \qquad a'p = \gamma \qquad up = \delta \qquad um = \varepsilon$$

Ici, pour avoir les indices des faces conformément à la notation de Miller, nous devons prendre, comme axes horizontaux, non les côtés du carré de base, mais ses diagonales, l'axe quaternaire étant l'axe vertical, de paramètre *c*, tandis que *a* (qu'on prend ordinairement égal à l'unité) est le paramètre commun des axes horizontaux.

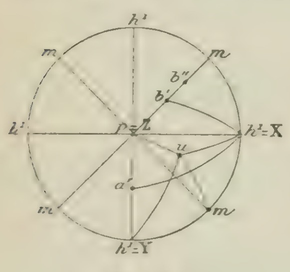


Fig. 261.

Établissons la perspective stéréographique de l'ensemble (fig. 261). Les perspectives des trois axes seront $Z = p$, $pX = ph^1$ et $pY = ph^1$. Les pôles b' et b'' viendront sur les lignes *pm*, à des distances angulaires de *p* égales aux suppléments de α et de β. De même, a' se placera sur ph^1, à une distance angulaire $pa' = \pi - \gamma$. Quant à l'un des pôles *u*, sa perspective se déterminera par la rencontre des perspectives de deux cercles décrits, l'un de *p* comme centre, avec une ouverture angulaire égale à $\pi - \delta$, l'autre de *m* comme centre, avec $\pi - \varepsilon$ pour ouverture.

1° *Calcul de b' et b''.*

D'après la formule fondamentale, si q_1 et s_1 sont les caractéristiques de b',

(1) Dans le *Manuel* de Des Cloiseaux, le rapport $\frac{b}{h}$ n'est pas $\frac{a}{c}$, car si $h = c$, *b* est le côté du carré dont *a* est la diagonale, il faut donc remplacer *b* par $a\sqrt{2}$.

q_2 et s_2 celles de b'', c'est-à-dire si la notation de b' est $\{q_1q_1s_1\} = b^{\frac{s_1}{2q_1}}$, celle de de b'', $\{q_2q_2s_2\} = b^{\frac{s_2}{2q_2}}$, on a :

$$\frac{\cos b'X}{\cos b'Z} = \frac{c}{a} \cdot \frac{q_1}{s_1};$$

or $b'Z = b'p$ et, dans le triangle rectilatère $b'pX$, on a

$$\cos b'X = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sin b'p$$

$\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right.$ étant le cosinus de l'angle $b'pX$, égal à 45 degrés$\left.\right)$.

Donc
$$\frac{c}{a} \cdot \frac{q_1}{s_1} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{\sin b'p}{\cos b'p} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot tg\, b'p$$

($b'p$ étant ici le supplément de α).

De même on aurait

$$\frac{c}{a} \cdot \frac{q_2}{s_2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot tg\, b''p.$$

Si, pour déterminer le rapport $\frac{c}{a}$, nous prenons justement b', ce qui revient à faire $b' = b^{\frac{1}{2}}$ ou $q_1 = s_1 = 1$, on aura

$$\frac{c}{a} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot tg\, b'p.$$

Cela posé, remplaçant $\frac{c}{a}$ par cette valeur, on aura

$$\frac{q_2}{s_2} = \frac{tg\, b''p}{tg\, b'p}.$$

Si, par exemple, ce rapport est égal à $\frac{1}{3}$, cela veut dire que $s_2 = 3q_2$. Donc la notation $b^{\frac{s}{2q}}$ devient $b^{\frac{3q_2}{2q_2}} = b^{\frac{3}{2}}$.

2° *Calcul de a'.*

On a
$$a' = a^{\frac{s_1}{r_1}} = \{ or_1s_1 \}.$$

On voit sans peine que $a'Y = 90^{\circ} - pa'$, tandis que $a'Z = pa'$ (pa' étant le supplément de l'angle mesuré γ). Donc la formule générale

$$\frac{\cos a'Y}{\cos a'Z} = \frac{\frac{r_1}{a}}{\frac{s_1}{c}} = \frac{c}{a} \cdot \frac{r_1}{s_1}$$

devient
$$\frac{c}{a}\frac{r_1}{s_1} = \frac{\sin pa'}{\cos pa'} = tg\, pa'.$$

Donc
$$\frac{r_1}{s_1} = \frac{a}{c} \cdot tg\, pa'.$$

3° *Calcul de* $u = \{ q_1 r_1 s_1 \}$.

Connaissant $pu = \pi - \delta$ et $um = \pi - \varepsilon$, il faut déterminer uX, uY et uZ

On a
$$uZ = pu.$$

Maintenant, dans le triangle *pmu*, rectilatère en *pm*, on a

$$\cos um = \sin pu . \cos mpu = \sin pu . \cos (45^\circ - upX).$$

Ayant upX, dans le triangle upX, rectilatère en pX, on calculera uX; de même dans puY, rectilatère en pY, avec $\mathrm{Y}pu = 90^\circ - up\mathrm{X}$, on aura uY. La connaissance des trois quantités permettra d'appliquer les formules générales, telles que
$$\frac{c}{a}\frac{r_1}{s_1} = \frac{\cos u\mathrm{Y}}{\cos u\mathrm{Z}}, \text{ etc.}$$

4° **Système rhomboédrique**. — Soient x, y, z (fig. 262) les trois pôles des faces du rhomboèdre primitif et P le pôle d'une face quelconque (qrs). Si l'on donne Px et Py, le triangle Pxy sera facile à déterminer. De la connaissance de ses angles Pxy et Pyx, on déduira Pxz et Pyz, en remarquant que, si α est l'angle plan du sommet du rhomboèdre, on a



$$\mathrm{P}xz = \alpha - \mathrm{P}xy, \qquad \mathrm{P}yz = \alpha - \mathrm{P}yx.$$

Fig. 262.

Alors les caractéristiques seront données par les équations [1] :
$$\frac{\sin \mathrm{P}xy}{\sin \mathrm{P}xz} = \frac{s}{r}, \qquad \frac{\sin \mathrm{P}yx}{\sin \mathrm{P}yz} = \frac{s}{q}.$$

L'angle Pxy doit être considéré comme positif quand Px est situé entre xy et xz, et négatif dans le cas contraire.

L'application des formules générales, pour la détermination des indices d'une forme quelconque, dont P est un pôle, exige la connaissance des distances angulaires PX, PY, PZ de ce pôle aux trois points où aboutissent les lignes menées, par le centre de la sphère, parallèlement aux trois axes ou arêtes culminantes du rhomboèdre primitif. Ces trois points seront faciles à trouver ; car ils tombent évidemment sur les lignes Tx, Ty, Tz, et les arcs XY, XY, YZ ne sont autres que les angles plans au sommet du même rhomboèdre primitif. Dès lors on peut considérer comme connus les arcs TX et Tx, respectivement égaux à TY, Ty, TZ, Tz.

(1) Voir Mallard, *Traité de Cristallographie*.

Le triangle Pxy, dont les trois côtés sont connus, permet de déterminer l'angle Pyx, d'où l'on déduit PyT, égal à Tyx diminué de Pyx. Alors, dans le triangle PyT, on peut calculer TP, ainsi que l'angle yTP. Dans ce cas, le triangle YTP fournira la valeur de PY, et PXT celle de PX.

Nous croyons inutile d'entrer dans le détail des calculs. Nous rappellerons seulement qu'on a

$$\sin \mathrm{T}x = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sin \frac{1}{2} yz.$$

On a quelquefois à chercher le symbole d'un rhomboèdre direct ou inverse, dont on connaît l'angle dièdre culminant : soit γ le supplément de ce dièdre. Dans ce cas, si $\{r o \bar{r} s\}$ est la notation à quatre caractéristiques de ce rhomboèdre, on a (en désignant par $\frac{a}{h}$ le rapport d'axes du rhomboèdre primitif) :

$$\cos \gamma = \frac{\frac{3}{2}\frac{a^2}{h^2}s^2 + r^2}{\frac{3}{2}\frac{a^2}{h^2}s^2 + 2r^2}.$$

On en déduit

$$\frac{r^2}{s^2} = \frac{3}{2}\frac{a^2}{h^2} \cdot \frac{1 - \cos \gamma}{2 \cos \gamma - 1}.$$

De là on passerait à la notation de Lévy en se rappelant que, suivant les cas, $\{r o \bar{r} s\}$ correspond à $a^{\frac{s+2r}{s-r}}$ ou à $e^{\frac{s+2r}{r-s}}$ et que $\{o r \bar{r} s\}$ peut correspondre à $a^{\frac{s-2r}{s+r}}$ et à $e^{\frac{2r-s}{s+r}}$.

5° **Système rhombique**. — Soit P (fig. 263) le pôle d'une pyramide quelconque et supposons que sa position soit fixée, par la connaissance des angles de la face P avec les faces p et m, d'où résulte celle des arcs supplémentaires PZ et Pm. L'axe des X, étant (1) celui qui doit avoir le plus petit paramètre a des deux axes horizontaux, est la brachydiagonale ph^1; tandis que la macrodiagonale pg^1 est l'axe des Y. Le triangle PZm, rectilatère en Zm, donne

$$\cos \mathrm{P}m = \sin \mathrm{PZ} . \cos m\mathrm{ZP}.$$

L'angle mZP une fois déterminé, comme PZY $= mg^1 - m$ZP, on peut calculer PY dans le triangle rectilatère PYZ. Enfin le triangle rectilatère PZX donnera PX, puisque l'angle PZX est le complément de PZY.

Les trois arcs PX, PY et PZ étant ainsi connus, l'application des formules

(1) Dans le mode d'orientation adopté par Naumann.

générales fournit les indices de la face P, en supposant que le rapport d'axes soit donné. Si ce rapport n'était pas préalablement fixé, on pourrait le déterminer en choisissant, pour le noter $b^{\frac{1}{2}}$, un pôle P situé sur Zm.

S'il s'agit de déterminer le symbole d'une protopyramide $b^{\frac{s}{2q}} = (qqs)$, dont le pôle B est situé sur Zm, on a

$$tg\, BZ.\, cos\, mg^1 = \frac{c}{b} \cdot \frac{q}{s}.$$

Si c'est un macrodôme $a^{\frac{s}{r}} = (ors)$, dont le pôle A serait sur Zh^1, on aurait

$$tg\, AZ = \frac{c}{b} \cdot \frac{r}{s}.$$

Enfin, pour un brachydôme $e^{\frac{s}{q}} = (qos)$, dont le pôle E serait sur Zg^1, on aurait

$$tg\, EZ = \frac{c}{a} \cdot \frac{q}{s}.$$

En appliquant ces formules au cas de a^1 et e^1, et remarquant que Z correspond au pôle de la base p, on trouve

$$tg\, pa^1 = \frac{c}{a} \qquad \text{et} \qquad tg\, pe^1 = \frac{c}{b},$$

ce qui, dans l'hypothèse ou b est pris pour unité, donne

$$tg\, pe^1 = c.$$

6° **Système monoclinique.** — Si, conformément aux indications qui seront données par la suite, à propos des diverses espèces monocliniques, on prend pour axes : 1° la clinodiagonale a ; 2° l'orthodiagonale $b = 1$; 3° l'arête $mm = c$, on voit, en se reportant à la figure 245, que l'orthodiagonale aboutit en g^1, que la clinodiagonale aboutit en x et $\bar{x}$, enfin que l'arête mm, ou axe de la zone mg^1, est figurée en $g^1 z$ ou $g^1 \bar{z}$. Les trois points g^1, x, $\bar{z}$ ou g^1, $\bar{x}$, z sont donc les points X, Y, Z où aboutissent les arêtes de la forme primitives, celles auxquelles se rapportent les formules générales de la page 206.

S'agit-il de déterminer, par le choix d'un hémiorthodôme a^1, la valeur du paramètre c, on a, en appliquant la forme générale :

$$\frac{cos\, a^1 x}{cos\, a^1 z} = \frac{\frac{q^1}{a}}{\frac{s_1}{c}} \frac{c}{a} \cdot \frac{q_1}{s_1}$$

ce qui se transforme en $\frac{c}{a}$, puisque, en choisissant pour a la notation a^1, on fait $q^1 = s^1 = 1$).

On voit alors que

$$cos\, a^1 x = sin\, pa^1 \qquad cos\, a^1 \bar{z} = cos\, (pa^1 - p\bar{z});$$

mais $\overline{pz} = 90° - ph^1$. Donc

$$\cos(pa^1 - \overline{pz}) = \cos(pa + ph^1 - 90°).$$

Donc

$$\frac{c}{a} = \frac{\sin pa^1}{\cos(pa^1 + ph^1 - 90°)} = \frac{\sin pa^1}{\cos(a^1h^1 - 90°)}.$$

Pour l'application de cette formule, il faut prendre les angles *aigus* de p avec a^1 et h^1.

Il n'en serait plus de même si l'on prenait, pour axes a et b, les deux côtés égaux de la base rhombe. Plaçons-nous maintenant dans cette dernière hypothèse et supposons que, les éléments fondamentaux de la perspective du cristal binaire ayant été établis (fig. 264) d'après la connaissance des angles mm et pm, il s'agisse de déterminer la notation de deux hémiorthodômes postérieurs a' et a'', c'est-à-dire $a^{\frac{s_1}{q_1}}$, $a^{\frac{s_2}{q_2}}$, tels que $pa' = \alpha$, $pa'' = \beta$.

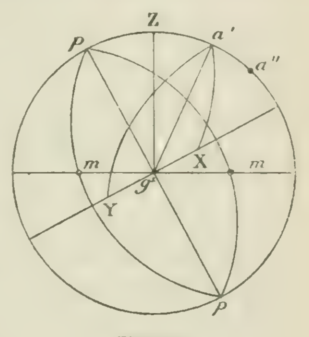


Fig. 264.

Il convient tout d'abord de fixer la place des extrémités X, Y et Z des trois axes, respectivement parallèles aux trois directions d'arêtes du parallélépipède fondamental. Le point Z est le pôle du cercle mm. Il coïncide donc avec l'extrémité de la ligne g^1Z, menée par le centre g^1, perpendiculairement à mm. Les arêtes X et Y sont contenues dans le plan de la base; leurs perspectives tombent donc sur une ligne perpendiculaire à g^1p, où elles doivent se disposer symétriquement de part et d'autre de g^1. Il suffit donc de déterminer $Xg^1 = \frac{1}{2}XY$. Mais nous savons que le triangle XYZ est polaire du triangle mmp et que, dès lors, $XY = 180° - p$. Il reste donc à déterminer cet angle p, qui est le double du dièdre mpg^1. Or, dans le triangle rectilatère mpg^1, on a

$$\cos mpg^1 = \frac{\cos mg^1}{\sin mp} = \frac{\cos \frac{1}{2}(mm)}{\sin mp}.$$

Les points X et Y une fois placés, considérons le triangle $a'XY$, qu'on peut diviser en deux triangles rectilatères, $a'g^1X$, $a'g^1Y$.

Les côtés g^1X, g^1Y étant égaux, tandis que g^1a' est commun aux deux triangles et que $a'g^1X$ est supplémentaire de $a'g^1Y$, on a :

$$\frac{\sin a'Y}{\sin a'X} = \frac{\sin a'g^1Y}{\sin a'g^1X} = 1.$$

Donc le côté $a'Y$ est supplémentaire de $a'X$, qui a le même sinus.

Or on a

$$\cos a'X = \sin g^1X \cos a'g^1X \qquad \cos a'Z = \cos (pa' - pZ);$$

mais $g^1X = \frac{1}{2}XY = 90° - mpg^1$ et $a'g^1X = 90° - a'g^1p = 90° - pa'$. Donc

$$\frac{\cos a'X}{\cos a'Z} = \frac{c}{a} \cdot \frac{q_1}{s_1} = \frac{\cos mpg^1 \sin pa'}{\cos (pa' - pZ)}. \qquad \text{(A)}$$

Pour la face a'', on aurait de même

$$\frac{\cos a''X}{\cos a''Z} = \frac{c}{a} \cdot \frac{q_2}{s_2} = \frac{\cos mpg^1 \sin pa''}{\cos (pa'' - pZ)}. \qquad \text{(B)}$$

Le rapport de ces deux expressions est

$$\frac{\frac{q_2}{s_2}}{\frac{q_1}{s_1}}.$$

Si l'on prend la face a' pour déterminer a^1, admettant $q_1 = s_1 = 1$, le rapport de (B) à (A) donne précisément la notation de a''.

Mais rappelons-nous qu'ici, c désignant toujours le paramètre de l'arête prismatique, a représente le côté de la base rhombe, c'est-à-dire $\sqrt{a^2+1}$ dans le cas où a^2 serait le carré de la clinodiagonale.

Résumé. Discussion de la forme primitive d'un cristal. — Nous ne donnerons pas ici d'exemples empruntés au système triclinique, où les calculs présentent le maximum de complication. On verra, dans le *Traité* de Mallard, de quelle manière on les simplifie, dans la pratique, par les choix des notations des faces fondamentales.

En résumé, quel que soit le nombre des intermédiaires par lesquels on est obligé de passer, d'abord pour fixer les pôles des trois faces du parallélépipède primitif *pmt*, puis les extrémités des axes de comparaison, X, Y, Z, enfin pour déterminer les distances angulaires d'un pôle aux trois points X, Y, Z, le problème cristallographique est au fond très simple et n'exige que de l'attention pour bien conduire les calculs.

Il convient maintenant de faire observer qu'il règne toujours, dans la détermination de la forme primitive, un certain arbitraire. En effet, nous avons vu que, dans le système quadratique, par exemple, on choisissait une protopyramide quelconque, pour représenter $b^{\frac{1}{2}}$. Dans le système monoclinique, non seulement le choix de la base p est arbitraire, comme celui des faces m (pourvu que la première soit normale à g^1 et que les faces m soient également inclinées sur g^1), mais on peut prendre, pour a^1 ou o^1, l'une quelconque des faces de la zone parallèle à l'axe binaire.

En vertu du choix qui doit être fait dans chaque cas particulier, les paramètres des axes de la forme primitive sont a, b, c; si le choix avait été diffé-

rent, les paramètres seraient devenus *ma*, *m'b*, *m''c*, *m*, *m'* et *m''* étant trois nombres entiers quelconques, et alors, les caractéristiques d'une face, qui étaient *q*, *r*, *s* dans la première hypothèse, seraient devenues, dans la seconde, *q'*, *r'*, *s'*.

Pour savoir si le choix de la forme fondamentale a été judicieusement fait, on se guide d'après ce principe, que les symboles des faces naturelles doivent être aussi simples que possible, surtout quand il s'agit de directions fréquemment réalisées, telles que les faces dominantes des cristaux, les plans de clivage et les plans d'accolement des cristaux maclés. Le meilleur choix de paramètres est donc celui qui, pour la série des faces connues, conduit aux symboles les plus simples. Mais, à ce titre, on peut dire que le problème de la détermination de la forme primitive est toujours ouvert. Il peut donner lieu à une série d'approximations successives, où les résultats du calcul sont contrôlés par l'observation et, quand la chose est possible, par l'expérimentation. C'est de la même manière que le chimiste parvient à la connaissance des poids atomiques, en faisant, sur la constitution des corps analysés, certaines hypothèses, à la vérification desquelles il appelle ensuite diverses considérations fondées sur l'isomorphisme, les chaleurs spécifiques et les densités de vapeurs.

Une forme cristalline n'est donc jamais déterminée que d'une manière en quelque sorte provisoire, et cela d'autant plus que bien des cristaux, d'apparence simple, résultent en réalité, comme nous le verrons, de groupements multiples, dont les éléments n'ont pas la même symétrie que celle qui paraît se montrer dans l'ensemble.

Cette réserve faite, il existe un moyen, développé par Mallard (1), de se rapprocher, aussi près que possible, de la connaissance du réseau géométrique qui convient le mieux à une substance donnée. Supposons qu'on ait calculé la forme primitive de cette substance, après avoir reconnu son genre de symétrie, en assignant à une ou plusieurs formes des symboles arbitraires. Le réseau est alors défini par les distances angulaires des pôles de ces formes, lesquelles sont des données d'observation.

Mais, en raison de l'inévitable imperfection des mesures, les angles qui ont servi à calculer le réseau ne peuvent pas être considérés comme absolument exacts et, dès lors, le réseau, tel qu'on l'a défini, ne convient qu'approximativement à la substance. Si, aux angles qu'on a choisis pour la définition, on en substituait d'autres, le réseau ainsi obtenu serait légèrement différent du premier. De cette manière, on peut essayer d'une série de combinaisons, qui toutes sont approchées à des degrés divers, et il est clair qu'en prenant la moyenne de toutes ces combinaisons, on aurait une solution encore plus voisine de la réalité.

(1) *Traité de Cristallographie*, I, p. 296.

C'est pour former cette moyenne que Mallard a donné, dans son *Traité*, des équations différentielles qui, combinées entre elles par la méthode des moindres carrés, conduisent à la détermination définitive des paramètres ainsi que des angles des axes conjugués.

Nous terminerons par une remarque, relative à l'arbitraire qui règne dans la manière de concevoir les formes rhombiques. Ces formes ayant trois plans de symétrie, dont aucun n'est de degré supérieur aux autres, on peut indifféremment appliquer, à l'un de ces plans, les notations p, h^1 ou g^1. Quand le cristal est aplati, il semble qu'il soit naturel de choisir la direction de l'aplatissement pour en faire celle de la *base p*. Cependant, tel cristal, placé par quelques cristallographes de cette façon, est conçu différemment par d'autres, qui font de la direction d'aplatissement la face g^1. De là, entre les descriptions données par les auteurs, une source de discordances apparentes; dont il est bon d'être prévenu pour éviter toute surprise.

LIVRE DEUXIÈME

CRISTALLOGRAPHIE PHYSIQUE

PREMIÈRE SECTION

PROPRIÉTÉS OPTIQUES DES CRISTAUX

CHAPITRE I

LOIS GÉNÉRALES DE LA PROPAGATION DE LA LUMIÈRE

§ I

DÉFINITION DES PHÉNOMÈNES LUMINEUX

Nous avons dit en commençant que les corps cristallisés possédaient une distribution régulière et symétrique des particules matérielles, d'où résultait, comme conséquence, une symétrie spéciale dans la répartition des propriétés physiques suivant les directions. Nulle part cette répartition n'est plus facile à étudier que dans les phénomènes optiques. Aussi l'optique des cristaux forme-t-elle, depuis longtemps, une branche importante de la science. Notre intention n'est pas d'approfondir ici des questions qui ne peuvent être convenablement développées que dans un Traité de physique. Mais, ayant à faire ressortir de quelle manière les divers genres de symétrie influent sur les propriétés optiques des corps cristallisés, nous croyons bien faire de rappeler quelques principes généraux, que nous présenterons dans leur enchaînement logique, renvoyant le lecteur curieux d'en connaître la démonstration aux nombreux ouvrages spéciaux qui traitent de cette matière (1).

(1) Nous citerons : Verdet, *Leçon d'optique physique* ; Groth, *Physikalische Krystallographie* ; Mascart, *Optique*, etc. ; mais surtout Mallard, *Traité de Cristallographie*, t. II.

Notion de l'éther, ses vibrations. — La lumière peut être considérée comme l'impression produite sur nos organes par les mouvements qui s'effectuent au sein d'un milieu impondérable, infiniment élastique, répandu dans tout l'espace et auquel les physiciens ont donné le nom d'*éther* (1).

Une particule d'éther, dérangée de sa position initiale, ne peut se mouvoir sans entraîner une infinité d'autres particules, en vertu des liaisons qui unissent entre eux les éléments du milieu éthéré. Ces mouvements, qui troublent l'équilibre du milieu, y font naître des réactions ou *forces élastiques*, tendant à rétablir la situation de repos. Chaque particule revient donc à sa position d'équilibre, avec une force qui dépend de la constitution spéciale du milieu dont elle fait partie, et qui suffit à lui faire dépasser cette position d'une quantité égale au déplacement primitif. Ainsi la particule exécute des oscillations ou *vibrations* et de même que, pour les ondes sonores, l'intensité du son est déterminée par l'amplitude des vibrations, tandis que sa qualité, c'est-à-dire sa hauteur, est réglée par leur durée ; de même l'*amplitude* des vibrations éthérées fixe l'*intensité* lumineuse, tandis que la *durée* de ces vibrations détermine l'*espèce* de la lumière, autrement dit la *couleur*. Il existe ainsi un grand nombre de *modes vibratoires*, caractérisés chacun par une couleur ou *radiation* simple, et leur superposition, telle qu'elle est réalisée dans les rayons solaires, produit ce qu'on appelle la lumière *blanche*.

Propagation de l'ébranlement lumineux. — Au moment où une particule d'éther commence à vibrer, elle entraîne celles qui sont situées dans son

(1) En présentant ici un rapide résumé de la théorie de l'éther telle qu'elle est communément enseignée, nous ne prétendons en aucune façon imposer la croyance à un milieu infiniment élastique, défini comme il l'a été par Fresnel. Ainsi que le montrait M. H. Poincaré, dans son magistral discours au Congrès de Physique de 1900, la conception d'un milieu universel du genre de l'éther s'impose à nous, parce qu'elle seule permet de relier, d'une façon continue, le phénomène optique visible à la cause, souvent très lointaine, qui le produit. Par exemple, quand nous voyons une plaque photographique devenir sensible à l'ébranlement lumineux parti, il y a un temps incalculable, d'une étoile infiniment éloignée, nous sommes invinciblement conduits à imaginer un intermédiaire qui, à travers l'espace et le temps, rétablisse la continuité entre la cause et l'effet.

Mais la nature de cet intermédiaire peut être conçue de façons très différentes. A la place d'un milieu infiniment élastique, en raison des liaisons qui unissent ses éléments, on peut, avec M. Marx, concevoir l'éther comme une sorte de gaz parfait, pourvu d'une tension déterminée. Chaque atome pondérable agirait, dans ce milieu, comme un centre de dépression, en équilibre avec l'éther ambiant. D'autres envisageront les corps pondérables comme de l'éther condensé, où les atomes seraient formés d'une infinité de corpuscules tournant avec une extrême vitesse autour d'un centre. De temps en temps, un corpuscule parviendrait à se détacher de son orbite pour circuler d'un atome à l'autre à l'état d'*électron*, impondérable à cause de sa petitesse, et l'ensemble de ces électrons constituerait le milieu vibrant désigné sous le nom d'éther. D'autres enfin, sans chercher à pénétrer la nature intime du milieu, se borneront à exprimer ses rapports avec les phénomènes par des équations différentielles, celles de la théorie électro-magnétique de Maxwell, lesquelles subsisteront en toute hypothèse, puisqu'elles rendent compte des faits.

Tout ce que nous nous proposons ici, c'est d'offrir un cadre dans lequel chaque phénomène trouve facilement sa place, en s'enchaînant logiquement avec ceux qui le précèdent. A ce seul point de vue, et à ne considérer l'optique que dans ses applications à l'enseignement de la cristallographie, la conception de l'éther infiniment élastique présente une simplicité didactique qui nous la fait ici préférer, mais simplement à titre de méthode d'exposition.

voisinage. De cette façon, un ébranlement lumineux, parti d'un certain centre, se propage dans toutes les directions, avec des vitesses qui, pour une radiation simple donnée, dépendent à la fois de la *densité* de l'éther et de son *élasticité;* c'est-à-dire : 1° du nombre des particules éthérées que contient une portion déterminée de l'espace; 2° des relations établies entre ces particules.

Au bout d'un certain temps, l'ébranlement, qui avait son origine en O, atteint au même moment toutes les particules distribuées sur une même surface, dite *surface d'onde*, et dont la forme dépend de la distribution de l'éther dans le milieu. Quand la constitution de ce milieu est telle que l'onde soit sphérique, on peut démontrer que, si O est le centre d'ébranlement, O′ l'un des points de la surface d'onde et P un point extérieur situé sur le prolongement de OO′, le mouvement de P n'est directement influencé que par celui de O′. C'est ce qu'on exprime en disant que *la lumière se propage en ligne droite.* A la notion d'un ébranlement lumineux, on peut donc substituer celle de *rayons* linéaires divergents. On admet que les vibrations de l'éther s'effectuent perpendiculairement au rayon. Donc, à chaque instant, le déplacement des particules éthérées a lieu dans un plan normal au rayon; mais, dans ce plan, l'orientation peut être quelconque et varie généralement, dans ce qu'on nomme la lumière *naturelle*, avec une très grande rapidité. Il n'en est pas ainsi quand la lumière est ce qu'on appelle *polarisée.* Dans ce cas, les vibrations sont *orientées* et ne s'effectuent que suivant l'intersection du plan normal au rayon, ou *plan de l'onde*, avec un autre plan, de direction définie, passant par ce même rayon.

Il y a en outre des modes vibratoires pour lesquels les vibrations, au lieu d'être rectilignes, se font circulairement ou elliptiquement.

Longueur d'onde. — Soit OO′ (fig. 265) un rayon lumineux, O étant le centre de l'ébranlement et O′ le point où cet ébranlement est parvenu quand la particule O a exécuté une vibration complète, c'est-à-dire quand, partie de O, elle y est revenue après s'être déplacée successivement de O en A, de A en B et de B en O. Au moment où elle repasse par sa position d'équilibre O, les particules voisines sont écartées de la situation de repos et, à une certaine distance OO_1, il s'en trouve une qui est à l'extrémité de sa course en B_1, l'intervalle OO_1 correspondant au temps que la particule O emploie pour aller de B en O. A une distance $O_1O_2 = OO_1$, on rencontre au même moment une particule traversant sa position d'équilibre, tandis que, de O_2 en O′, il y a écart en sens contraire. L'intervalle OO′, qui est l'espace parcouru par l'ébranlement lumineux parti de O, pendant la durée d'une vibration entière, porte le nom de *longueur d'onde* et se désigne par λ. Deux particules d'éther O_1 et O_3, séparées l'une de l'autre par une longueur égale à $\frac{1}{2}\lambda$, se trouvent, au même moment,

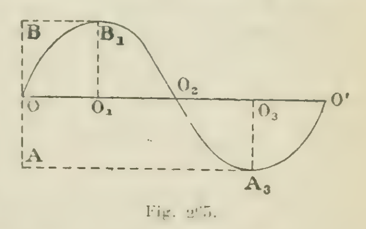


Fig. 265.

dans des états vibratoires opposés ou, comme on dit aussi, dans des *phases opposées*, et tous les états vibratoires possibles sont représentés simultanément sur l'intervalle d'une longueur d'onde.

Pour une même vitesse de propagation, la longueur d'onde est évidemment d'autant plus grande que la durée de la vibration est elle-même plus longue. Ainsi, pour chaque radiation simple, λ doit posséder une valeur spéciale.

Interférences. — D'après ce qui précède, si plusieurs ébranlements lumineux viennent à se superposer, une même particule d'éther pourra se trouver, à un moment donné, sollicitée, soit à se déplacer dans une même direction par deux impulsions exactement de même sens, soit à se déplacer simultanément dans deux directions opposées, par des impulsions de sens contraires. Elle pourra donc, dans le premier cas augmenter, dans le second cas diminuer l'amplitude de ses vibrations. C'est ainsi que la superposition de deux mouvements lumineux peut parfois amener la suppression totale de l'état vibratoire, c'est-à-dire de la lumière. Ces phénomènes d'addition et de suppression ont reçu le nom d'*interférences*.

Pour que l'interférence d'extinction se produise, il faut que les deux mouvements qui tendent à se communiquer simultanément à la particule d'éther soient dans des phases rigoureusement opposées, c'est-à-dire qu'ils diffèrent l'un de l'autre par un *nombre impair de demi-longueurs d'onde*. Or la valeur de λ étant spéciale à chaque nature de radiations, l'interférence absolue, c'est-à-dire la suppression totale de l'effet lumineux, ne peut avoir lieu que si l'on emploie une lumière simple, comme celle que fournit la flamme de l'alcool salé. Avec la lumière blanche, il y a seulement production d'une teinte colorée, par suite de la disparition, dans le faisceau total, de celle des radiations qui est atteinte par l'interférence.

De plus les interférences en lumière blanche ne sont sensibles à l'œil que quand la différence de marche des vibrations concourantes n'est pas trop considérable. Supposons, en effet, que deux mouvements vibratoires se trouvent dans des phases qui diffèrent de $\frac{41\lambda}{2}$, λ se rapportant, par exemple, à l'une des radiations du violet. Cette couleur se trouvera éteinte. Mais il peut se faire que $\frac{41\lambda}{2}$ soit équivalent à $\frac{37\lambda'}{2}$ pour une autre radiation, appartenant au faisceau bleu, à $\frac{33\lambda''}{2}$ pour une troisième, faisant partie du vert, etc. Dans ce cas, plusieurs radiations pourront se trouver éteintes ensemble dans les diverses parties du faisceau total, et il en résultera une teinte blanchâtre affaiblie, à laquelle on donne le nom de *blanc d'ordre supérieur*. Ici donc c'est en quelque sorte l'excès du phénomène qui en empêche la manifestation.

Enfin il convient d'ajouter que l'interférence n'est possible qu'entre rayons issus de la même source, suivant presque rigoureusement le même chemin, et

qu'elle ne se produit pas quand les rayons sont polarisés à angle droit l'un sur l'autre.

Vitesse de propagation. Élasticité et densité de l'éther. — La longueur d'onde est d'autant plus grande : 1° que la vitesse de propagation du mouvement est plus considérable ; 2° que la durée de la vibration AB est plus longue. Quant à l'amplitude de cette vibration, comme il s'agit de très petits mouvements, on admet qu'elle n'influe pas sur la durée. Mais la vitesse de propagation varie avec les milieux et, de plus, pour un milieu donné, elle peut différer suivant la nature des radiations, c'est-à-dire précisément suivant la durée des vibrations. Néanmoins, dans l'air et dans le vide, il ne paraît pas que les vitesses de propagation des diverses radiations diffèrent d'une manière appréciable (1).

Dans chaque milieu, l'élasticité e et la densité d de l'éther ont des valeurs particulières, en relation avec la distribution de la matière pondérable dans ce milieu. Mais tandis que la densité est constante dans toutes les parties d'un milieu homogène, l'élasticité peut varier suivant la direction du mouvement vibratoire, ce qui se comprend, cette élasticité étant la force de résistance développée par l'union réciproque des particules d'éther, et cette force pouvant varier, suivant la manière dont la vibration, par la direction qu'elle affecte, met en jeu ces actions réciproques. En tout cas, la relation qui unit la vitesse à ces deux éléments est

$$v = \sqrt{\frac{e}{d}}$$

Cela posé, il y a deux sortes de milieux à distinguer : les milieux dits *isotropes*, pour lesquels la valeur de e et, par suite, celle de v, sont indépendantes de la direction des mouvements vibratoires ; et les milieux dits *anisotropes* ou *hétérotropes*, dans lesquels ces éléments diffèrent avec la direction des vibrations.

§ 2

TRANSMISSION DE LA LUMIÈRE DANS LES MILIEUX ISOTROPES

Milieux isotropes. Réflexion. — Examinons d'abord le cas des milieux isotropes et cherchons ce qui doit se produire quand l'ébranlement lumineux atteint la surface de séparation de deux milieux de ce genre.

Puisque la propagation de la lumière met en jeu l'élasticité de l'éther, pour prévoir ce qui va se passer, il convient de se reporter à ce que nous enseigne l'examen des corps élastiques. On sait que, si une bille pourvue d'élasticité

(1) Dans l'air, la valeur moyenne de la longueur d'onde, pour la lumière blanche, est de $0^m,000\,000\,5$ (soit *un demi-micron*) et le nombre des vibrations éthérées est de 600 trillions par seconde.

vient à en choquer une autre suspendue dans son voisinage immédiat, les phénomènes produits diffèrent suivant la grosseur relative des billes. Quand la bille choquée est sensiblement plus grosse, elle renvoie la première en arrière et ne prend elle-même qu'un faible mouvement en avant. Si c'est l'inverse, presque tout le mouvement se communique à la seconde, sauf une partie qui demeure dans la première. Si les billes sont rigoureusement égales, la première cède tout son mouvement à la seconde.

De même, un ébranlement lumineux, arrivant à la surface de séparation de deux milieux, peut être, soit *rejeté* dans le premier milieu, ce qui produit la *réflexion*, soit communiqué et *transmis* au second, ce qui donne lieu à la *réfraction*. Les lois suivant lesquelles s'accomplissent ces changements peuvent être prévues *a priori*, si l'on part du *principe de la moindre action*.

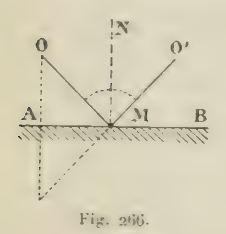


Fig. 266.

Soient O et O′ (fig. 266) deux points du premier milieu. Pour que l'ébranlement parti de O arrive en O′ dans le moins de temps possible, après avoir touché la surface de séparation AB des deux milieux, il faut (comme on le démontre sans peine) que le rayon incident OM et le rayon réfléchi MO′ soient contenus dans un même plan, perpendiculaire à la surface AB et que, dans ce plan, ils fassent, avec la normale MN à cette surface, des angles égaux. C'est ce qu'on exprime en disant que *l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion*.

Refraction dans les milieux isotropes. — Mais pour que cette réflexion ait lieu, il faut que le second milieu diffère considérablement du premier au point de vue optique ; car le phénomène de la réflexion offre une complète analogie avec le rebondissement d'une bille élastique, qui vient d'en choquer une autre beaucoup plus grosse.

Si la différence entre les deux milieux est moins tranchée, une partie au moins de l'ébranlement pénètre dans le second. La lumière n'est plus simplement réfléchie ; elle est *transmise*. Mais elle rencontre, dès son arrivée dans le nouveau milieu, une nouvelle vitesse de propagation, d'où résulte une modification dans les conditions du mouvement.

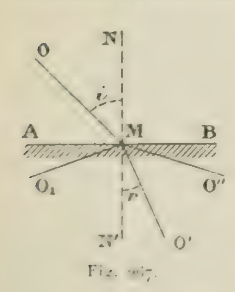


Fig. 267.

Soient O (fig. 267) un point du premier milieu, où la vitesse est v, et O′ un point du second, où la vitesse est v'. On démontre que la distance de O en O′ sera parcourue dans le moins de temps possible, si la lumière suit une ligne brisée, composée de deux parties se joignant sur la surface de séparation du milieu et telles que, le rayon incident et le rayon *réfracté* se trouvant dans un même plan avec la normale NN′ à la surface, il y ait, entre l'angle d'incidence $i = \text{OMN}$ et l'angle de réfraction $r = \text{N'MO'}$, la relation constante :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v}{v'}.$$

Quand le premier milieu est l'air, le rapport $\frac{v}{v'}$ prend le nom d'*indice de réfraction* et on a coutume de le représenter par la lettre n. Mais comme, dans un milieu sensiblement plus réfringent que l'air, les diverses radiations ne se propagent pas avec la même vitesse, l'indice de réfraction d'un corps liquide ou solide n'a de sens précis que quand on spécifie la radiation à laquelle il s'applique, par exemple la raie D de la partie jaune du spectre solaire.

On trouvera, dans les traités de physique, la description des procédés qu'il convient d'employer pour la mesure des indices de réfraction. On la détermine d'habitude à l'aide d'un prisme taillé dans la substance et qu'on place dans la position du *minimum de déviation*.

La loi qui vient d'être indiquée porte le nom de loi de Descartes et, jointe à la précédente, elle règle la propagation de la lumière dans les milieux isotropes. Ces deux lois sont des conséquences immédiates du *principe de la moindre action*, c'est-à-dire de la *moindre consommation de force vive*.

La différence entre i et r, autrement dit la déviation du rayon, est d'autant plus marquée qu'il y a plus de différence entre v et v'. Aussi dit-on qu'un milieu est d'autant plus *réfringent*, relativement à l'air, que la vitesse de propagation y est moindre.

Dispersion ; réflexion totale. — Les vibrations dues aux diverses radiations simples se propageant, dans un milieu tel que le verre, avec des vitesses différentes, à chaque valeur de la longueur d'onde λ correspond un indice de réfraction particulier. Les radiations simples sont donc inégalement déviées et la déviation est d'autant plus forte, comme le montre l'expérience, que la longueur d'onde est plus petite. Ainsi elle atteint son maximum avec le violet et son minimum avec le rouge. Quand cette déviation est rendue suffisamment sensible par la convergence des surfaces d'entrée et de sortie de la lame réfringente, il se produit ce qu'on appelle une *dispersion*, c'est-à-dire que, à la place du faisceau incident de lumière blanche, on peut recevoir sur un écran un faisceau réfracté de lumière *décomposée*, où les diverses teintes se succèdent du rouge au violet.

La formule de la réfraction s'applique également à la sortie d'un rayon O'M, passant d'un certain milieu dans un autre moins réfringent. Mais le rapport $\frac{\sin r}{\sin i}$ ne peut dépasser un maximum, qui est 1. Si donc le rayon, tel que O'' M, rencontre assez obliquement la surface AB pour que, d'après la formule, le rapport dût être plus grand que 1, le rayon O'' M *ne sort pas* ; il est réfléchi et rentre suivant MO_1 dans le milieu réfringent. C'est ce qu'on appelle subir la *réflexion totale* et l'angle r' de cette réflexion est donné par la formule

$$\frac{1}{\sin r'} = \frac{v}{v'} = n.$$

n étant l'indice de réfraction du milieu réfringent, ralativement à l'air, pour la radiation employée.

Réfractomètres. — D'après la relation qui vient d'être établie, le phénomène de la réflexion totale peut être utilisé pour la mesure des indices de réfraction. Sur ce principe sont fondés divers instruments, appelés *réfractomètres*. L'un des plus faciles à manier est le réfractomètre de M. Em. Bertrand. Il n'exige pas la confection d'un prisme et peut s'appliquer à un morceau quelconque d'une substance donnée, pourvu qu'on y ait ménagé une petite face plane.

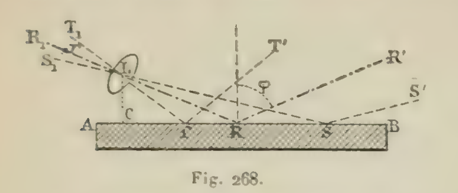


Fig. 268.

Soit AB (fig. 268) la face plane de la lame dont on veut mesurer l'indice n et qu'on suppose plongée dans un milieu plus réfringent, d'indice N. Un rayon R'R, venant de ce milieu et atteignant la surface AB sous un angle d'incidence φ tel que $sin\ \varphi = \frac{n}{N}$, sera réfléchi totalement en RR_1. Il en sera de même, *a fortiori*, des rayons tels que SS', pour lesquels l'angle d'incidence est supérieur à φ, tandis que les autres, tels que TT', ne seront que partiellement ou pas du tout réfléchis.

Si L est le centre optique d'une lentille et LC la perpendiculaire à AB, les rayons parallèles à RR_1, qui passent en L, viendront former image en r. Les rayons totalement réfléchis, comme SS_1, formeront leur image au-dessous de r, tandis que les rayons que la plaque transmet ou ne réfléchit qu'en partie, comme TT_1, auront leur image au-dessus de r. Faisons maintenant tourner LR autour de LC ; le point r décrira un cercle, dont la concavité sera tournée vers le haut et ce cercle servira de limite entre les deux parties du champ de vision, l'une, supérieure, qui sera obscure, la seconde, inférieure, qui sera éclairée.

Lorsque les rayons qui éclairent la plaque viennent de l'infini, il faut que la lentille L soit l'objectif d'une lunette astronomique. Pour éviter l'emploi d'une telle lunette, M. Bertrand fait arriver les rayons sur une lentille hémisphérique, terminée inférieurement par une face plane, contre laquelle on applique, par l'intermédiaire du liquide réfringent, la face plane du corps à étudier. Alors les rayons donnent une image réelle, qu'on observe à l'aide d'un oculaire muni d'un réticule. Les divisions marquées sur le fil vertical du réticule permettent de définir le point où ce fil est coupé par le cercle-limite et, moyennant un tableau dressé d'avance, on en déduit l'indice avec une approximation qui dépasse la seconde décimale.

§ 3

DISTRIBUTION DE L'ÉLASTICITÉ OPTIQUE DANS LES MILIEUX ANISOTROPES. ELLIPSOIDE DES INDICES

Principe de la recherche. Composition des petits mouvements. — Si les choses se passent, dans les milieux isotropes, avec la simplicité qui vient d'être indiquée, cela tient à ce que, ces milieux offrant une égale élasticité optique dans toutes les directions, toute particule d'éther y est indifférente au sens suivant lequel elle peut être sollicitée à se déplacer. De la sorte, un seul changement intervient, celui de la vitesse, entraînant comme conséquence une modification dans la direction du rayon réfracté, laquelle ne peut plus coïncider avec celle du rayon incident

Il en est tout autrement dans un milieu anisotrope. L'impulsion donnée à une particule y peut, suivant sa direction, faire naître des forces élastiques capables de dévier le mouvement incident. Dès lors, à la surface de séparation d'un milieu isotrope et d'un autre anisotrope, il se produit, non seulement un changement dans la *direction de propagation*, par suite de la différence des vitesses, mais encore une altération dans la *direction même du mouvement vibratoire*. Pour pouvoir préciser la nature de cette altération, il convient de rappeler quelques principes fondamentaux.

En premier lieu, la théorie indique que, si une particule matérielle, appartenant à un milieu élastique, subit un très petit déplacement de O en O', la force élastique produite par ce mouvement est la même que si, après avoir imprimé à la particule O trois déplacements successifs, égaux à la projection de OO' sur trois axes rectangulaires, on formait la résultante mécanique des trois forces élastiques partielles, successivement développées par les trois mouvements élémentaires. Ainsi, quand il s'agit de connaître les élasticités mises en jeu par de très petits mouvements, on peut, à un déplacement donné, substituer ses composantes suivant trois directions rectangulaires, arbitrairement choisies.

Ce principe une fois admis, on en déduit la loi suivant laquelle varient les forces élastiques, pour tous les déplacements qu'on peut imprimer à une même particule d'éther, suivant toutes les directions possibles, issues de son centre.

Distribution des forces élastiques. Loi de l'ellipsoïde. — Soit O (fig. 269) la position d'équilibre d'une particule d'éther. Si l'on imprime à cette particule un déplacement très petit suivant une direction quelconque OA, les liaisons établies dans le milieu éthéré feront naître une certaine force élastique E^2 qui, en général, ne sera pas dirigée suivant OA. Supposons que OF représente la direction et la vraie grandeur de E^2. Sur OF, prenons $OF' = \frac{1}{E}$ et projetons orthogo-

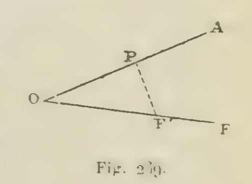


Fig. 269.

nalement OF′ sur OA en OP. La ligne OP, située sur la direction même du déplacement, aura une longueur parfaitement déterminée. Or, si l'on agit de même pour toutes les directions de déplacement qu'on peut concevoir autour du point O, on trouvera que *le lieu des points* P *est un ellipsoïde à trois axes* (1).

De plus, ainsi qu'il est d'ailleurs facile de s'en rendre compte, en réfléchissant que tout est symétrique de part et d'autre des trois axes d'un ellipsoïde, ces axes sont trois directions privilégiées, jouissant de la propriété suivante : la force élastique, développée par un déplacement dirigé dans le sens de l'un de ces axes, coïncide en direction avec le déplacement lui-même. Ainsi, pour les trois axes, OF′ se confond avec sa projection OP, c'est-à-dire que $OP = \frac{1}{E}$.

D'ailleurs, parmi les trois demi-axes, il y en a deux qui sont, l'un le plus grand, l'autre le plus petit de tous les rayons de l'ellipsoïde. Soit $\frac{1}{a}$ le premier, $\frac{1}{c}$ le second. Cela veut dire que a^2 est la plus petite et c^2 la plus grande des forces élastiques propres au milieu. Ces deux quantités a^2 et c^2 sont dites élasticité *minima* et élasticité *maxima*. En les réunissant à la valeur intermédiaire ou *moyenne* b^2 (qui n'en est pas la moyenne arithmétique), on a ce qu'on appelle les trois *élasticités principales* du milieu. Et parce que les trois demi-axes ont respectivement pour valeurs les inverses de a, de b et de c, l'ellipsoïde que nous considérons porte le nom d'*ellipsoïde inverse d'élasticité optique*.

D'autre part, si 1 représente la vitesse de propagation dans l'air, la vitesse dans le milieu considéré est la racine carrée de l'élasticité, et l'*indice*, ou rapport des vitesses, devient égal à l'inverse de cette racine carrée. Donc $\frac{1}{a}$ est l'*indice de réfraction des vibrations parallèles au grand axe*, tandis que $\frac{1}{b}$ est

(1) Il est à remarquer que la loi de l'ellipsoïde n'est pas exclusivement propre aux phénomènes lumineux. On la retrouve à la base de toutes les théories physiques, qu'il s'agisse de conductibilité calorifique ou d'élasticité. Ainsi que le démontre Mallard au début du deuxième volume de son *Traité de Cristallographie*, cela tient, non à l'identité intrinsèque des phénomènes, mais au *concept* que la théorie est obligée de s'en former, en admettant la *continuité des milieux*. Bien que la matière soit essentiellement discontinue, les intervalles moléculaires sont si petits, eu égard aux moyens de mesure dont nous disposons, qu'on peut, *sans inconvénient pratique*, substituer aux corps naturels des milieux continus équivalents. Dans ce cas, si l'on admet (ce que font toutes les théories) que chaque propriété physique soit une *fonction continue* des coordonnées des points du milieu, la théorie mathématique des fonctions permet immédiatement de poser des formules qui, en s'arrêtant aux premiers termes, conduisent à l'équation d'un ellipsoïde. Mais ce n'est nullement l'expression d'une loi naturelle : c'est simplement la conséquence d'une hypothèse fondamentale qui, certainement, ne correspond pas à la vérité absolue, mais qui du moins s'en écarte assez peu pour que les résultats de la théorie demeurent sensiblement d'accord avec ceux de l'expérience. C'est ainsi que Mallard a pu dire que « la physique mathématique n'est au fond que l'étude des propriétés mathématiques imposées aux phénomènes par la continuité supposée du milieu ». Pour se rapprocher de la réalité, il faudrait, à la notion des fonctions continues, substituer celle de fonctions *périodiques*, exprimant la discontinuité ordonnée de la matière.

l'indice pour l'axe moyen et $\frac{1}{c}$ l'indice pour le petit axe. La substance a donc trois *indices principaux* de réfraction, auxquels les trois axes de l'ellipsoïde sont proportionnels, ce qui fait qu'on peut, avec M. Michel-Lévy, donner à cette surface le nom d'*ellipsoïde des indices*. Le grand axe représente l'*indice maximum* et le petit axe l'*indice minimum*. Celui auquel correspond l'axe moyen est l'*indice moyen*. M. Michel-Lévy (1) les désigne respectivement par n_g (le plus grand), n_p (le plus petit) et n_m (moyen).

Outre ces indices principaux, la substance en possède une infinité d'autres, puisqu'à chaque direction de vibration correspond une valeur particulière de l'élasticité optique.

Avant d'aller plus loin, remarquons que, pour un milieu donné, la force élastique développée doit dépendre de la nature du mouvement vibratoire incident, c'est-à-dire de l'espèce de la radiation. Chaque milieu éthéré, supposé homogène, n'a donc pas un ellipsoïde unique. Il en possède un *pour chaque espèce de vibrations*, et il n'y a pas de raison, dans le cas le plus général, pour que ces ellipsoïdes ne diffèrent pas les uns des autres, à la fois par les grandeurs et les directions de leurs axes principaux. Un corps anisotrope a donc autant d'*indices principaux* qu'il y a de radiations. Dès lors il doit être entendu que tout ce qui va suivre s'applique au cas d'une lumière simple ou *monochromatique*, telle que celle qu'on peut obtenir avec la flamme de l'alcool salé.

Cas particuliers. — La forme d'un ellipsoïde dépend de la valeur relative de ses trois axes. Il peut se présenter trois cas :

1° $a = b = c$. Les trois élasticités principales sont égales entre elles. Alors l'ellipsoïde se transforme en une sphère. Il n'y a plus de directions privilégiées ou plutôt toutes les directions jouissent du même privilège, c'est-à-dire que partout il y a coïncidence entre le sens de la force élastique et celui du déplacement. Pour un mouvement donné, cette force élastique est d'ailleurs la même, quelle que soit la direction du déplacement. La vitesse de propagation des vibrations est donc indépendante du sens dans lequel elles s'exécutent. C'est-à-dire qu'un tel milieu est *isotrope* et ne possède, pour chaque radiation, qu'un seul indice. Au bout d'un temps déterminé, toutes les molécules qui se trouvent dans le même état de vibration sont réparties sur une sphère, dont le rayon est proportionnel à la vitesse de propagation propre au milieu ; ainsi la *surface d'onde* est sphérique.

2° $b = c$. Dans ce cas, l'ellipsoïde est *de révolution* autour de l'axe $\frac{1}{a}$, qui devient son demi-axe *polaire*, $\frac{1}{b}$ étant la valeur du demi-axe *équatorial*, ou plutôt du rayon du cercle équatorial. Il n'y a, dans le milieu, que deux élasticités principales, a^2 et b^2, à angle droit l'une sur l'autre ; mais la plus grande peut être tantôt a^2 et tantôt b^2. Il n'y a aussi que deux indices principaux, $\frac{1}{a}$ et $\frac{1}{b}$.

(1) *Les Minéraux des Roches*. Paris, 1888.

3° a, b et c diffèrent. Alors l'ellipsoïde est à trois axes inégaux.

Dans ce troisième cas, comme dans le second, à part des exceptions que nous aurons prochainement à examiner, à toute direction de vibration correspond une longueur spéciale du rayon de l'ellipsoïde et, par suite, une vitesse particulière de propagation. En outre, la force élastique n'étant pas, en général, dirigée dans le sens du déplacement de la particule d'éther, un mouvement lumineux qui vient à rencontrer un tel milieu doit se trouver altéré, à la fois dans la valeur de sa vitesse de propagation et dans la direction de ses vibrations. C'est le cas des corps que nous avons appelés *anisotropes*.

§ 4

CORPS ET CRISTAUX ISOTROPES. CRISTAUX A UN ET A DEUX AXES

Corps amorphes. — Cela posé, si on veut savoir quelle sera (pour une radiation simple donnée) la forme de l'ellipsoïde afférent à un corps déterminé, il suffit de considérer de quelle façon la distribution de l'éther peut être influencée par la constitution des corps pondérables.

On sait qu'en vertu d'une hypothèse de Fresnel, les choses se passent comme si chaque atome pondérable était entouré d'une atmosphère d'éther condensé, le degré de condensation étant d'ailleurs une fonction de la nature du corps. Il suit de là que la distribution, sur une direction donnée, des particules d'éther, doit dépendre du nombre et de la nature des particules pondérables que rencontre cette direction.

Si nous considérons un corps amorphe, nous savons que l'ordonnance des particules y est nulle. C'est pourquoi toutes les directions se valent, étant également peu ordonnées. Une vibration incidente, quelle que soit son orientation, rencontrera partout la même élasticité, concordante avec la direction du mouvement. Toutes ces élasticités égales engendreront une surface sphérique. Le corps sera donc *isotrope*.

Aucune cause ne tendant à dévier la vibration incidente, celle-ci se propagera dans le milieu isotrope sans changer de direction. Mais, dans ce milieu, l'élasticité et la densité de l'éther ont des valeurs nouvelles, d'où résulte en général un rapport différent de celui qui caractérisait le milieu où la vibration avait pris origine. La vitesse de propagation doit donc changer. Et comme nous savons que le rapport des vitesses détermine la réfraction qui s'opère à la surface de séparation de deux milieux, le fait que ce rapport soit invariable entraîne, pour chaque rayon incident, la formation d'un seul rayon réfracté. *Les corps isotropes sont donc uniréfringents.*

Corps cristallisés. Cristaux cubiques. — Quant aux corps cristallisés,

nous savons qu'ils sont caractérisés par l'ordonnance très régulière de leurs particules, variable selon les directions suivies. Mais suffira-t-il, à cet égard, d'envisager la distribution des *particules complexes*, telle que la révèle le système réticulaire du corps cristallisé? On l'a pensé pendant longtemps, et c'est ainsi qu'on se croyait autorisé à formuler les règles qui vont suivre :

Le cas d'une surface d'élasticité sphérique doit être réalisé, non seulement par les corps amorphes, chez lesquels nous savons que toutes les directions sont équivalentes (c'est-à-dire également peu ordonnées), mais aussi par les cristaux du système cubique. En effet, ceux-ci possédant trois axes quaternaires identiques, lesquels forment un système trirectangulaire, et ces axes ne pouvant pas ne point coïncider avec les directions principales d'élasticité optique, la distribution identique des particules suivant ces trois axes entraîne l'identité de répartition de l'éther par rapport à trois directions rectangulaires; cela suffit pour que l'ellipsoïde devienne une sphère.

Par conséquent, tout point matériel d'un cristal cubique devrait être indifférent au sens dans lequel il est atteint par un ébranlement lumineux. La lumière, à son passage dans le cristal, ne subirait donc d'autre changement que celui qui résulte de la nouvelle vitesse de propagation, c'est-à-dire que tous les cristaux cubiques devraient être *uniréfringents*.

On remarquera que la symétrie optique se montre ainsi d'un ordre plus simple que la symétrie géométrique; car tandis que, en dehors des axes quaternaires, les diverses rangées du système cubique diffèrent les unes des autres par leurs paramètres, toutes se confondent au point de vue optique, voyant se développer la même élasticité, concordante avec le sens du mouvement.

Cristaux anisotropes. — Dans tous les autres systèmes cristallins, il n'y a jamais trois directions rectangulaires qui soient identiques. La surface d'élasticité y sera donc toujours un ellipsoïde. Ainsi tous les cristaux n'appartenant pas au système cubique sont *anisotropes*. Mais leur constitution optique peut être définie plus étroitement, si l'on analyse les conditions de la réfraction dans ces milieux.

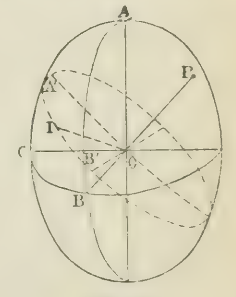


Fig. 270.

Pour cela, considérons une onde vibratoire incidente et, regardant la surface d'onde comme l'enveloppe de ses plans tangents, décomposons l'onde totale en une infinité d'ondes planes élémentaires. Pour simplifier, nous ne nous occuperons que de l'élasticité développée par une de ces ondes planes, admettant, ce que l'expérience ne contredit pas, qu'elle est en rapport défini avec l'élasticité totale.

Au moment où cette onde plane élémentaire, perpendiculaire au rayon lumineux PO (fig. 270), atteint le milieu anisotrope, la vibration de la molécule d'éther O, située à la surface de séparation des deux milieux, tend à s'effectuer, dans le plan de l'onde, suivant une direction déterminée et, en général,

cette direction est telle qu'un déplacement de même sens provoquerait, dans le second milieu, une force élastique non concordante avec le sens du mouvement. Considérons cette force élastique et décomposons-la en trois composantes rectangulaires, dont l'une soit dirigée normalement au plan de l'onde, tandis que les deux autres sont contenues dans ce plan. Nous savons que cette substitution est parfaitement admissible. Ajoutons enfin une dernière hypothèse, à savoir que la composante normale au plan de l'onde est sans influence sur la propagation de la lumière dans le second milieu.

Parvenus à ce point, nous avons remplacé la vibration incidente OI par deux autres, rectangulaires entre elles, mais dont rien encore ne fixe autrement la position. Or le plan de l'onde, dans lequel ces deux composantes sont contenues, coupe l'ellipsoïde relatif au second milieu suivant une certaine ellipse A'B' et la théorie montre que les deux axes OA' et OB' de cette ellipse jouissent (et jouissent seuls dans leur plan) de la même propriété que les trois axes de l'ellipsoïde ; c'est-à-dire que, suivant chacun d'eux, un déplacement vibratoire engendre une force élastique dont la direction coïncide avec celle du mouvement. Cette propriété peut d'ailleurs se justifier suffisamment par cette considération, que c'est évidemment suivant les axes de la section elliptique qu'il y a le plus de symétrie entre l'onde incidente, d'une part, et le milieu biréfringent, de l'autre.

Dès lors, si nous choisissons, pour vibrations composantes du mouvement incident, celles mêmes qui sont dirigées suivant les deux axes de l'ellipse en question, nous serons assurés que, par exception, ces deux vibrations, *équivalentes à la vibration incidente*, pourront se transmettre *sans altération* dans le second milieu (puisqu'elles n'y exciteront pas de résistance oblique). Il n'y aura de changement que dans la vitesse de propagation, ce qui se traduit, comme nous le savons déjà, par une *réfraction*.

Double réfraction. — Mais cette réfraction ne sera pas simple. En effet, considérons les deux axes de la section elliptique. La vitesse de propagation des vibrations parallèles au grand axe est proportionnelle à la racine carrée de l'élasticité développée. Soit v_1 cette vitesse. Celle des rayons parallèles au petit axe sera différente et égale à v_2. Mais puisque la direction du rayon réfracté, relativement au rayon incident, est donnée, conformément à la formule des sinus, par le rapport de la vitesse v dans l'air à la vitesse de propagation dans le second milieu, on voit que chacune des vibrations incidentes donnera lieu à un rayon réfracté spécial, ce qui fait qu'un même objet, vu à travers le milieu considéré, fournira deux images distinctes. La position des deux rayons pourra être définie par les formules :

$$\frac{\sin i}{\sin r_1} = \frac{v}{v_1} \quad \text{et} \quad \frac{\sin i}{\sin r_2} = \frac{v}{v_2}.$$

Or v, vitesse dans l'air, étant pris pour unité, chacun de ces deux rapports

est l'*indice* propre aux vibrations qui ont les directions OA' et OB'. Le plus grand, marqué par la longueur du demi-grand axe OA', peut être désigné par n'_g, et le plus petit ou OB' par n'_p. D'ailleurs, si n_g et n_p sont les deux indices extrêmes du milieu, on sait qu'on a $n_g > n'_g$ et $n_p < n'_p$; car un ellipsoïde ne comporte aucun diamètre qui soit supérieur à son grand axe ou inférieur à son petit axe.

Ainsi un même rayon incident donnera lieu à deux rayons réfractés, définis par les angles r_1 et r_2, et cheminant dans le second milieu avec des vitesses distinctes v_1 et v_2. C'est ce qu'on exprime en disant que les milieux anisotropes sont *biréfringents*. Empressons-nous d'ajouter que, dans la nature, la différence des angles r_1 et r_2 est généralement très faible, et qu'il y a extrêmement peu de substances où la double réfraction soit perceptible à l'œil nu, comme c'est le cas pour la calcite ou carbonate de chaux rhomboédrique. Néanmoins cette double réfraction existe et elle est la conséquence nécessaire de ce fait, qu'il n'y a dans un plan que deux directions, suivant lesquelles les vibrations incidentes puissent se transmettre d'un milieu à un autre sans autre changement que celui de la vitesse.

La règle à suivre, pour analyser le phénomène lumineux dans les cristaux anisotropes, est donc celle-ci : regarder le point de la surface atteint par l'ébranlement comme le centre de l'ellipsoïde des indices propre à la substance considérée. Par ce centre, mener un plan parallèle au plan de l'onde, et déterminer les deux demi-axes de la section elliptique, suivant laquelle ce plan coupe l'ellipsoïde. Ces demi-axes serviront à fixer les vitesses v_1 et v_2 (1).

Dans le plan de la section elliptique, les forces élastiques développées suivant les deux axes sont l'une le maximum, l'autre le minimum de l'élasticité optique. Aussi peut-on dire que les deux composantes de la double réfraction ont les directions de la plus grande et de la plus petite élasticité dans le plan parallèle au plan de l'onde, ou, ce qui revient au même, les directions du plus grand et du plus petit indice dans ce plan.

D'après cela, si l'on applique, à un cristal biréfringent, la méthode du réfractomètre à réflexion totale, on obtient une double image du cercle limite de la portion obscure, ce qui peut donner une mesure approchée des deux indices propres à la plaque.

Cas exceptionnels de biréfringence. — Il importe de noter que la biréfringence n'est pas le privilège exclusif des corps cristallisés non cubiques. Cette propriété peut être exceptionnellement acquise, soit par des cristaux cubiques, soit par des corps amorphes, tels que le verre. Il suffit pour cela qu'un phénomène mécanique, par exemple une pression exercée dans un certain sens, ou un phénomène physique, comme la trempe pour le verre, ait modifié la disposition des molécules et, par suite, la distribution de l'élasticité.

(1) Cette règle n'est rigoureusement exacte que dans le cas de l'incidence normale des rayons.

La sphère qui exprimait l'allure optique des corps isotropes se trouve ainsi déformée et plusieurs des phénomènes caractéristiques des corps biréfringents peuvent se manifester avec plus ou moins de netteté. Ce fait demande à n'être pas oublié dans la pratique et il convient de ne pas imputer de prime abord, au système cristallin, certaines propriétés optiques, qui pourraient recevoir, de l'état de compression ou de tension du milieu, une explication suffisante.

Polarisation. — La double réfraction n'est pas le seul phénomène qui se produise dans le passage de la lumière à travers les milieux anisotropes. Nous avons dit que toute vibration incidente s'y décomposait en deux autres, suivant les axes de la section elliptique, déterminée par le plan de l'onde dans l'ellipsoïde des indices du milieu. Or, dans la lumière naturelle, le sens des vibrations change avec rapidité, de telle sorte qu'à divers moments, la direction du déplacement d'une particule d'éther est loin d'être constante. Mais quelle que soit cette direction OI (fig. 270), à un moment donné, le sens des deux composantes OA′ et OB′, entre lesquelles la vibration se partage, demeure invariable et, par suite, chacune d'elles donne naissance à un rayon *polarisé*. De plus les deux axes de la section elliptique étant rectangulaires, les deux rayons issus de la double réfraction sont polarisés à angle droit. Enfin les vibrations s'effectuant suivant des lignes droites, la polarisation est dite rectiligne. Ainsi l'on peut dire que l'effet des milieux anisotropes est de transformer un rayon de lumière naturelle incidente en deux rayons de lumière polarisée, dont les vibrations rectilignes, à angle droit l'une sur l'autre, sont désormais *orientées* (1).

Malgré cette polarisation, les deux images, que fournit un même objet, ne se distinguent pas sous le rapport de l'intensité. En effet, le partage de la vibration incidente entre ses deux composantes se fait bien, à chaque moment, d'une façon inégale, suivant que la direction de cette vibration est plus ou moins inclinée sur les axes de la section elliptique. Mais une vibration de lumière naturelle tournant avec une extrême rapidité dans le plan de l'onde, chacune de ses composantes passe, très vite, tour à tour, par un minimum égal à zéro et par un maximum égal à la vibration incidente elle-même. L'impression résultante est celle d'une valeur moyenne constante et égale, pour chacune des deux composantes, à la moitié du maximum. De cette façon, les deux images d'un même objet ont une intensité égale, dont la valeur est la moitié de l'intensité lumineuse de l'objet.

Cristaux à un axe optique. — Si tous les cristaux qui n'appartiennent pas au système cubique sont biréfringents, ils ne s'en divisent pas moins en deux grandes classes, suivant la nature particulière de leur ellipsoïde d'élasticité.

Dans tous les cristaux sénaires, le plan principal contient trois axes binaires de première espèce, suivant lesquels l'élasticité optique doit être la même. D'ailleurs l'axe sénaire ne peut manquer de coïncider avec la direction du

(1) La polarisation de la lumière incidente se produit aussi, mais seulement d'une manière *partielle*, par la réflexion et la réfraction dans les milieux uniréfringents.

maximum ou du minimum d'élasticité. Car si cette coïncidence n'existait pas, la direction en question devrait se répéter autour de l'axe sénaire et ne serait plus seule de son espèce. Donc, l'axe sénaire coïncidant avec l'une des directions d'élasticités principales, le plan qui lui est normal détermine, dans l'ellipsoïde, une section possédant trois diamètres égaux. Cette section ne peut être qu'un cercle et, par suite, l'ellipsoïde est de *révolution* autour de l'axe principal.

Le cas serait exactement le même pour le système ternaire. Quant au système quaternaire, il comporterait, normalement à l'axe principal, une section caractérisée par l'existence de deux couples de diamètres égaux et rectangulaires, ce qui encore ne peut être réalisé que par un cercle. En résumé, les cristaux caractérisés par l'existence d'un axe principal, c'est-à-dire ceux des systèmes sénaire, quaternaire et ternaire, ont tous pour surface d'élasticité un ellipsoïde de révolution, l'axe polaire de cet ellipsoïde pouvant, suivant les cas, correspondre soit au maximum, soit au minimum d'élasticité.

Cela posé, tout rayon cheminant suivant l'axe cristallographique principal a, par cela même, ses vibrations localisées *dans le plan de la section équatoriale* de l'ellipsoïde, laquelle est *circulaire*. Il n'y a dès lors plus lieu de décomposer ces vibrations en deux, l'ellipse de section étant devenue un cercle, dont tous les rayons ont la même valeur. Une vibration, quelle qu'en soit la direction, rencontre partout la même élasticité, qui est b^2, si le rayon équatorial est $\frac{1}{b}$. Donc le rayon incident ne se partage pas en deux, c'est-à-dire que l'axe principal est, pour ces cristaux, une direction exceptionnelle d'*uniréfringence*. On lui donne pour ce motif le nom d'*axe optique* et les cristaux pourvus d'un axe cristallographique principal prennent le nom de ***cristaux à un axe optique*** ou, plus habituellement, celui de ***cristaux à un axe*** ou ***uniaxes***.

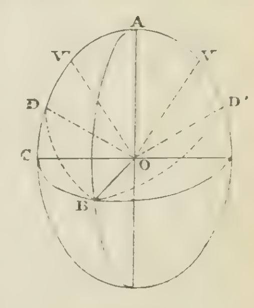


Fig. 271.

Cristaux à deux axes optiques. — Considérons maintenant les cristaux des systèmes terbinaire, binaire et triclinique. Les premiers ont trois axes binaires, avec lesquels doivent nécessairement coïncider les trois élasticités principales et qui deviennent, dès lors, les axes de l'ellipsoïde optique. Pour les cristaux binaires, l'axe unique fixe la direction de l'un des trois axes de l'ellipsoïde, les deux autres étant simplement assujettis à se trouver dans le plan de symétrie. Enfin, dans le système triclinique, aucune condition ne règle à l'avance l'orientation de l'ellipsoïde. Dans les trois cas, cet ellipsoïde est à trois axes inégaux. Soient (fig. 271) OA, OB, OC ces trois axes, et supposons OA > OB > OC. Figurons les trois sections principales OAB, OAC, OBC. Dans la section OAC, définie par les axes du maximum et du minimum d'élasticité, il existe un certain rayon OD, qui est précisé-

ment égal à l'axe d'élasticité moyenne. Si, par OD et OB, on mène un plan, ce plan coupera l'ellipsoïde suivant une courbe possédant deux diamètres égaux, rectangulaires l'un sur l'autre et tels que la courbe soit symétrique relativement à chacun d'eux. Une telle courbe ne peut être qu'un cercle. Ainsi DOB est une direction de *sections circulaires* pour l'ellipsoïde en question. Il en est de même de la direction symétrique D'OB. Tout ellipsoïde possède ainsi deux directions conjuguées de sections circulaires.

Cela posé, si l'on considère des rayons cheminant suivant OV, OV', perpendiculaires respectivement à DOB et D'OB, ou, ce qui est la même chose, des ondes planes se propageant suivant OV et OV', les vibrations de ces ondes, contenues dans le plan des sections circulaires, rencontreront partout la même élasticité. Elles se propageront donc sans altération et ainsi les deux lignes OV, OV' seront, pour le cristal, deux lignes d'uniréfringence. Il n'y en a d'ailleurs pas d'autres qui jouissent de la même propriété. De la sorte, les cristaux appartenant aux trois derniers systèmes peuvent être dits *cristaux à deux axes optiques* et, plus brièvement, *cristaux à deux axes* ou *biaxes*.

On remarquera que les deux axes optiques sont toujours situés dans le plan qui contient les directions de plus grande et de plus petite élasticité, c'est-à-dire des deux indices extrêmes, chacune de ces directions étant la bissectrice de l'un des deux angles supplémentaires que font entre eux les axes en question. L'une de ces bissectrices est dite *aiguë* et l'autre *obtuse*. Le rôle de bissectrice de l'angle aigu des axes peut échoir tantôt à la ligne du maximum, tantôt à la ligne du minimum d'élasticité, mais jamais à une autre. La bissectrice obtuse est souvent qualifiée de *normale optique*, et quand on emploie simplement le mot de *bissectrice*, cela veut dire que l'on parle de la bissectrice aiguë.

Il convient maintenant d'observer qu'il n'y a pas parité entre l'axe optique unique des cristaux *uniaxes* et les deux directions uniréfringentes des cristaux *biaxes*. En effet, tout plan mené par un axe optique unique coupe l'ellipsoïde de révolution suivant une ellipse génératrice. L'axe est donc une ligne de *symétrie optique absolue*, en même temps qu'une direction de réfraction simple. Au contraire, les divers plans, menés par les normales aux sections circulaires d'un ellipsoïde à trois axes, coupent cette surface suivant des courbes différentes, non symétriques relativement aux axes optiques. Ces derniers sont donc simplement des lignes d'uniréfringence.

Anomalies optiques. — D'après la théorie qui vient d'être exposée, tout cristal cubique devrait être isotrope et uniréfringent, le privilège de la biréfringence étant exclusivement réservé aux cristaux des autres systèmes, lesquels seraient uniaxes, quand ils sont pourvus d'un axe cristallographique principal, et biaxes quand il n'en ont pas.

Toutefois l'expérience montre que ces règles d'apparence si simple sont souvent en défaut, beaucoup de cristaux qui manifestent extérieurement la symétrie cubique n'étant pas optiquement isotropes, en même temps que des cris-

taux à axe principal se montrent optiquement biaxes. De là toute une catégorie de phénomènes, qu'on a coutume de ranger sous le nom d'*anomalies optiques* et que Mallard avait essayé d'expliquer en supposant que les formes cristallines apparentes devaient résulter d'un groupement particulier de cristaux, individuellement moins symétriques que l'ensemble.

Mais ces anomalies peuvent disparaître si, avec M. Wallerant, on tient compte des nombreux cas de mériédrie à symétrie restreinte, où un corps adopte en cristallisant un réseau d'ordre plus élevé que sa particule, et si, en même temps, on regarde la symétrie optique comme gouvernée, non par la disposition réciproque des particules complexes, mais surtout par la constitution intime de ces dernières.

Influence des particules complexes. — Réfléchissons en effet que si, dans la molécule chimique, chaque atome pondérable a son atmosphère propre d'éther condensé, cette molécule à elle seule entraîne déjà, au sein de l'éther général, une différenciation créant un milieu hétérogène. Or le milieu engendré par l'agglomération de plusieurs molécules chimiques en *particules fondamentales* serait bien plus éloigné de la constitution de l'éther libre; et la différence deviendra beaucoup plus grande encore si l'on envisage la *particule complexe*, elle-même formée par le groupement symétrique de plusieurs particules fondamentales. Un tel milieu est optiquement spécifié, en même temps que ses dimensions en doivent rendre les propriétés accessibles à l'observation directe; et c'est cette constitution qui se trahirait dans l'allure optique de l'assemblage cristallin, quel que soit le réseau géométrique choisi.

L'attribution aux particules complexes d'une individualité optique reconnaissable est d'autant plus légitime que cette individualité est réalisée en fait par des groupements beaucoup moins avancés que ceux des cristaux. En effet, il existe des liquides, tels que ceux étudiés par MM. Reinitzer et Lehmann (1), qui sont biréfringents entre leur température de fusion et une température supérieure, à partir de laquelle seulement ils deviennent isotropes. D'autres liquides ont la propriété de la polarisation rotatoire, qui semblerait devoir être l'apanage des cristaux. Il est donc rationnel de penser que les particules complexes, bien plus avancées comme groupement que ne peuvent l'être les éléments d'un liquide, sont, par elles-mêmes, des édifices assez considérables et assez spécifiés pour imprimer définitivement leur marque à l'éther ambiant.

Par conséquent, pour décider du véritable caractère optique d'un corps cristallisé, c'est la symétrie de la particule complexe, et non celle du réseau, qu'il faut faire entrer en ligne de compte. D'après cela, seront seuls isotropes les cristaux dont la particule complexe offrira la symétrie terquaternaire; tandis que les particules pourvues d'un seul axe d'ordre multiple donneront des cristaux uniaxes, et que celles de symétrie moins élevée engendreront toutes des cristaux biaxes.

(1) Voir Perrin, *Revue générale des sciences*, 30 nov. 1900.

C'est ainsi qu'une substance, à laquelle les éléments limites de sa particule auront permis d'adopter un réseau cubique, n'en sera pas moins biaxe si sa particule n'a pas d'axe ternaire, et uniaxe si elle n'en possède qu'un seul. Ce ne sera pas une *anomalie*, mais une conséquence logique de la différence qui peut exister entre la symétrie du réseau et celle de la particule complexe.

Ces réserves faites, nous allons maintenant poursuivre l'étude des propriétés des corps biréfringents.

CHAPITRE II

POLARISATION PAR LES CRISTAUX BIRÉFRINGENTS

§ 1

POLARISATION PAR LES CRISTAUX UNIAXES

Décomposition d'une vibration incidente. — Dans les cristaux uniaxes, l'ellipsoïde des indices est une surface de révolution. Soit $OA = \frac{1}{a}$ le demi-axe polaire de cet ellipsoïde et $OB = \frac{1}{b}$ son demi-axe équatorial. Supposons une onde plane incidente dont le plan, mené par O (fig. 272), coupe l'ellipsoïde suivant une ellipse CDEF.

Si le rayon équatorial OB = OC est plus petit que le rayon polaire (ce qui est le cas de la figure), il sera, par cela même, le plus petit de tous ceux qui vont du centre de l'ellipsoïde à la surface.

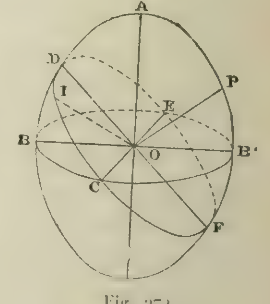


Fig. 272.

Par conséquent, le rayon OC, intersection du plan de l'onde avec le cercle équatorial, ne pourra être que le petit axe de l'ellipse CDEF. Ainsi, *quelle que soit la direction de l'onde plane, l'ellipse de section a toujours $\frac{1}{b}$ pour demi-petit axe.*

Inversement, si OB était plus grand que OA, ce rayon, correspondant au minimum d'élasticité, serait le plus grand de tous ceux de l'ellipsoïde. Dès lors la valeur $\frac{1}{b}$ marquerait le *demi-grand axe* de l'ellipse de section, quelle que fût la direction de l'onde plane.

De toutes façons, l'ellipse de section a toujours l'un de ses demi-axes constant et égal à $\frac{1}{b}$. Quant à l'autre, OD, sa valeur, toujours intermédiaire entre OA et OB, varie, suivant l'inclinaison de l'onde, depuis $\frac{1}{a}$ jusqu'à $\frac{1}{b}$.

Rayon ordinaire, rayon extraordinaire. — Or nous savons que les vitesses de propagation des vibrations réfractées sont respectivement en rapport avec les inverses des demi-axes OC et OD. Par suite, sur les deux vibrations, OC et OD, entre lesquelles se décompose une vibration incidente, telle que OI, l'une, OC, se propagera toujours, quelle que soit sa direction, avec la vitesse b, tandis que la vitesse de propagation de OD variera, suivant que l'onde plane sera plus ou moins inclinée sur l'équateur, entre les deux limites a et b.

Mais c'est justement le rapport des vitesses qui fixe la valeur de l'indice de réfraction, d'où l'on déduit l'angle de réfringence en fonction de l'angle d'incidence. Pour la vibration OC, l'indice sera constant, dans quelque sens que OC soit dirigé. Le rayon issu de OC suivra donc la loi de Descartes. On lui donne, pour ce motif, le nom de *rayon ordinaire* et l'indice correspondant s'appelle *indice ordinaire*. On le note n_o.

Au contraire, le deuxième rayon a un indice variable entre deux limites, dont l'une correspond à OB, c'est-à-dire à l'indice ordinaire, et l'autre à OA, c'est-à-dire à la valeur qui diffère le plus de la première. Il n'y a donc pas, pour ce second rayon, de rapport constant entre les sinus des angles d'incidence et de réfraction. Ce rayon n'obéit pas à la loi de Descartes et porte, pour ce motif, le nom de *rayon extraordinaire*. On appelle aussi *indice extraordinaire*, en la représentant par n_e, la valeur extrême dont l'indice variable est susceptible, c'est-à-dire celle qui correspond à l'axe polaire. On démontre encore, en physique, que, la plupart du temps, le rayon extraordinaire s'écarte du plan d'incidence.

Signe optique. Cristaux attractifs ou positifs. Cristaux répulsifs ou négatifs. — Supposons $a < b$, c'est-à-dire $\frac{1}{a} > \frac{1}{b}$, ou $n_e > n_o$. Dans ce cas, c'est le rayon ordinaire qui se propage le plus vite. Si l'on suppose une face d'incidence normale à l'axe optique, le rapport

$$\frac{v}{b} = \frac{\sin i}{\sin r},$$

relatif au rayon ordinaire, est plus petit que le rapport

$$\frac{v}{a'} = \frac{\sin i}{\sin r'},$$

relatif au rayon extraordinaire, a' étant compris entre a et b. Donc $\sin r$ est plus grand que $\sin r'$, c'est-à-dire que l'angle r est plus grand que l'angle r'. Le rayon extraordinaire est plus dévié que l'autre ; il semble qu'il ait été comme *attiré* par l'axe optique, avec lequel il fait maintenant un plus petit angle ; aussi les cristaux de cette catégorie sont-ils appelés *attractifs*.

On leur donne aussi le nom de *positifs* et l'on voit qu'il sont essentiellement caractérisés par un ellipsoïde *renflé suivant le diamètre polaire*.

Au contraire, quand on a $a > b$, le rayon extraordinaire semble *repoussé* par l'axe optique. C'est le cas des cristaux *répulsifs* ou *négatifs*, dont l'ellipsoïde est *aplati suivant le diamètre polaire.*

En un mot, le *signe optique* d'un cristal uniaxe est défini par le rapport $\frac{n_o}{n_e}$ de l'indice ordinaire à l'indice extraordinaire, rapport *plus grand que l'unité pour les cristaux négatifs* et *plus petit que l'unité pour les cristaux positifs.*

Parmi les cristaux attractifs, on peut citer ceux des substances suivantes : Apophyllite, Boracite, Dioptase, Glace, Quartz, Zircon. Les cristaux répulsifs, plus nombreux, sont ceux de : Apatite, Béryl, Calcite, Corindon, Dolomie, Idocrase, Mica, Néphéline, Tourmaline, Wernérite, etc.

Mais il ne faut pas oublier que le *signe optique* d'un cristal uniaxe *peut être spécial à la radiation simple considérée.* Ainsi certains cristaux se montrent positifs pour une des extrémités du spectre et négatifs pour l'autre.

Polarisation spéciale des vibrations réfractées. — Quelle que soit la direction de l'onde plane DOC, la vibration ordinaire OC, contenue dans le plan équatorial BCB′, se trouve perpendiculaire à la fois à l'axe polaire OA et à la vibration extraordinaire OD, qui forme l'autre demi-axe de la section elliptique. Donc la ligne OC est normale au plan DOA. Mais ce plan est le même que le plan AOP, mené par l'axe optique OA et par le rayon incident OP, normal au plan de l'onde. Admettons que AOP réalise aussi la condition de renfermer la normale à la face d'incidence. Un plan normal d'incidence, quand il contient l'axe optique, prend le nom de *section principale.* Cela posé, on peut dire que, dans un milieu uniaxe, les vibrations ordinaires sont orientées *perpendiculairement à la section principale.* Cette section joue donc, relativement aux particules vibrantes, le rôle d'un *plan d'équilibre*, de part et d'autre duquel les oscillations atteignent la même amplitude. C'est ce qu'on exprime en disant que le *rayon ordinaire est polarisé dans la section principale.*

Quant au rayon extraordinaire, sa vibration étant OD, le plan d'équilibre, perpendiculaire à OD, est en même temps perpendiculaire à la section principale. Aussi dit-on que *le rayon extraordinaire est polarisé perpendiculairement à la section principale.*

L'un des axes, OD, de la section elliptique, est toujours situé dans le plan qui contient le rayon incident OP et l'axe optique OA. L'autre axe OC, normal à ce plan, se trouve dans la section équatoriale de l'ellipsoïde.

Prisme de Nicol. — Le passage de la lumière à travers un cristal uniaxe donne deux rayons polarisés à angle droit. Si l'on veut éliminer l'un d'eux pour ne recevoir, à la sortie, que de la lumière polarisée dans un plan déterminé, on se sert d'un *prisme de Nicol.*

Soit RASB (fig. 273) un rhomboèdre de clivage de spath d'Islande, dont toutes les faces sont par conséquent des faces p, et supposons ce rhomboèdre allongé suivant une des arêtes culminantes AS (A jouant ici le rôle d'angle

culminant *a*), de manière à prendre une forme de prisme oblique. Le plan diagonal qui passe par RA et SB est (dans l'hypothèse où les faces prismatiques sont égales entre elles, ce qu'on réalise par la taille), un plan de symétrie du rhomboèdre. Ce plan contient donc l'axe ternaire, c'est-à-dire l'axe optique. De plus il contient aussi, nécessairement, la normale à la face supérieure RA, puisqu'il est perpendiculaire à cette face. Le plan RASB est donc la *section principale* du prisme de spath.

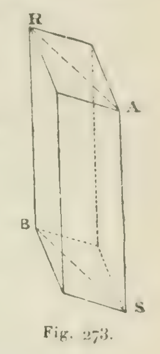


Fig. 273.

Représentons cette section (fig. 274), dans le plan du tableau, par le parallélogramme RASB, et supposons que, le prisme ayant été scié en deux suivant une face plane *ab*, normale à la section principale et faisant avec AR un angle d'environ 87 degrés, les deux moitiés aient été recollées avec du baume de Canada. L'indice de réfraction de ce baume est intermédiaire entre l'indice ordinaire et l'indice extraordinaire du spath. Lors donc que l'inclinaison de la face *ab* a été convenablement calculée, un rayon incident VI, situé dans la section principale et pénétrant par la face RA, dans une direction peu différente de la normale, donne un rayon ordinaire IO, qui subit sur *ab* la réflexion totale et va se perdre dans la monture noircie du prisme, tandis que le rayon extraordinaire IE traverse le baume ainsi que la seconde moitié du prisme et sort en CD, parallèlement à VI, restant uniquement composé de lumière qui est polarisée perpendiculairement à la section principale.

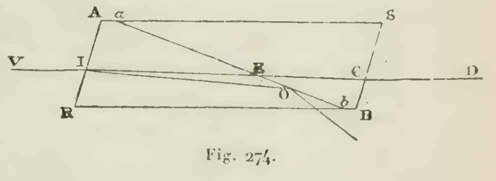


Fig. 274.

Le prisme de Nicol a été récemment l'objet de divers perfectionnements. Le plus important est celui qui a été imaginé par M. Em. Bertrand pour augmenter, dans une proportion considérable, le champ de l'instrument.

Combinaison d'un polariseur et d'un analyseur. — Si le rayon qui s'est polarisé en traversant un prisme de Nicol est reçu ensuite sur un autre prisme identique, la manière dont les choses se passent dépend de l'orientation relative des deux nicols. Supposons que leurs sections principales soient exactement parallèles. La vibration incidente, contenue dans le plan commun de ces sections, passe dans la première moitié du second nicol sans donner de composante ordinaire. Il n'y a donc aucun affaiblissement de l'image fournie par le premier nicol. Les sections sont-elles croisées à angle droit? La composante extraordinaire de la vibration issue du premier nicol, la seule qui puisse passer dans le second, se trouve nulle. Il y a extinction totale. Enfin, pour toute autre orientation relative, une partie de la vibration extraordinaire du premier nicol passe dans le second, parallèlement à la section principale de celui-ci; l'autre partie, fournissant la composante ordinaire, est arrêtée par le baume et ainsi l'œil ne reçoit plus qu'une image affaiblie de l'objet. De cette

façon, un rayon lumineux étant disposé de manière à traverser successivement deux nicols, dont le premier prend le nom de *polariseur* et le second celui d'*analyseur*, si, le polariseur restant fixe, on fait tourner l'analyseur, l'éclairement du champ de vision varie constamment, depuis un maximum jusqu'à l'obscurité complète. Cette dernière se produit lorsque les sections principales des nicols deviennent rectangulaires, tandis que le maximum d'éclairement a lieu à 90° de cette position.

La combinaison d'un polariseur et d'un analyseur fournit le moyen de reconnaître si une substance est isotrope ou non. Il suffit d'interposer une lame de la substance entre les nicols croisés. S'il s'agit d'un corps isotrope, rien ne sera changé, dans la traversée de ce corps, à la direction des vibrations qui sortent du polariseur. L'obscurité persistera donc. Si, au contraire, le corps est anisotrope, la vibration incidente s'y décomposera suivant les deux axes de la section elliptique correspondante. Dès lors une partie de cette vibration cessera d'être orientée perpendiculairement à la section principale de l'analyseur; elle arrivera à ce dernier dans des conditions de polarisation qui lui permettront de le franchir et ainsi la lumière sera partiellement rétablie. Ce procédé serait inefficace s'il s'agissait d'une lame cristalline taillée perpendiculairement à l'axe optique d'un cristal uniaxe ou à l'un des axes optiques d'un cristal biaxe; en effet, ces directions ne donnant lieu qu'à une réfraction simple, toute lame biréfringente qui leur est normale se comporte comme si elle était isotrope. En résumé, il y a, entre les nicols croisés, avec une lumière simple, pour toute position de la plaque, extinction totale : 1° avec les lames des corps isotropes; 2° avec les lames biréfringentes, taillées normalement à un axe optique.

Pour savoir, en pareil cas, laquelle des deux alternatives est réalisée, il suffit d'incliner la plaque, de manière que les rayons la traversent suivant une direction assez différente de la normale. L'obscurité ne persiste alors que si la substance est isotrope.

Pince à tourmalines. — On peut encore obtenir de la lumière polarisée par divers autres moyens, tels que l'emploi d'une pile de glaces. L'un des plus simples, et qui fournit en même temps un système de polariseur et d'analyseur, est le procédé de la *pince à tourmalines*. Pour le bien comprendre, sans avoir au préalable étudié les phénomènes de la coloration des cristaux, il suffit de réfléchir que l'absorption de la lumière par les corps colorés témoigne d'un affaiblissement de la force vive de l'ébranlement lumineux. Cet affaiblissement ne doit pas être le même pour tous les modes vibratoires, et on comprend qu'il soit en rapport avec leur vitesse de propagation. En particulier, il peut affecter inégalement les radiations ordinaires et les radiations extraordinaires. C'est ce qui se produit, dans une mesure spéciale, avec la tourmaline verdâtre ou brune. Les vibrations ordinaires y sont si fortement absorbées qu'une plaque de peu d'épaisseur suffit à les arrêter totalement. La tourmaline est un

cristal négatif, c'est-à-dire que les vibrations ordinaires y sont plus retardées que les autres; il est donc naturel qu'elles soient aussi plus rapidement absorbées. Cet effet sera le mieux marqué si la plaque est taillée parallèlement à l'axe optique. En effet, dans ce cas, un rayon incident normal voit ses vibrations, contenues dans le plan même de la plaque, s'y décomposer en deux, l'une extraordinaire, suivant l'axe optique lui-même, l'autre, ordinaire, perpendiculairement à cet axe. C'est donc pour cette position qu'il y a le plus de différence entre les vitesses de propagation, alors égales à a pour les vibrations extraordinaires et à b pour les autres. Avec une plaque de ce genre, la rapidité de l'extinction de ces dernières sera donc proportionnellement plus grande.

Sur ce principe est basée la construction de la *pince à tourmalines*. Deux lames de tourmaline verte, taillées parallèlement à l'axe et épaisses d'environ un millimètre et demi, sont disposées l'une au-devant de l'autre, dans une monture métallique assez élastique pour permettre l'interposition d'une lame cristalline qu'on veut étudier. En tournant le cercle dans lequel l'une des deux tourmalines est enchâssée, on amène l'appareil au maximum d'obscurité, c'est-à-dire qu'alors les sections principales sont à angle droit l'une sur l'autre. On peut donc procéder comme avec les nicols croisés; mais si cet instrument est peu coûteux et d'un maniement facile, en revanche, la couleur assez foncée de la tourmaline y détermine un notable affaiblissement de l'intensité des images, ce qui est un inconvénient sérieux, lorsqu'on ne se borne pas à observer les phénomènes d'extinction.

Souvent on combine une lame de tourmaline verte avec une autre de couleur brune, ce qui donne au croisement une obscurité plus parfaite. Mais la lame brune a besoin d'être considérablement amincie et son épaisseur ne doit être qu'une petite fraction de millimètre.

§ 2

POLARISATION PAR LES CRISTAUX BIAXES. — EXTINCTIONS DES LAMES BIRÉFRINGENTES

Caractères des deux rayons réfractés dans les cristaux biaxes. — Tout cristal biaxe a, pour ellipsoïde des indices, un ellipsoïde à trois axes inégaux, dont les moitiés ont respectivement pour valeurs $\frac{1}{a}$, $\frac{1}{b}$, $\frac{1}{c}$. Supposons $a < b < c$. Une onde plane quelconque coupe cet ellipsoïde suivant une ellipse, dont les demi-axes, $\frac{1}{a'}$ et $\frac{1}{b'}$, variables avec la direction de l'onde, sont compris entre un maximum égal à $\frac{1}{a}$ et un minimum égal à $\frac{1}{c}$. Par conséquent, on peut dire que les deux rayons auxquels donne lieu la biréfringence, dans un cristal biaxe, *sont l'un et l'autre extraordinaires*. Chacune des deux vibrations, pola-

risées à angle droit, se propage avec une vitesse variable, dont le minimum est a et le maximum c. Les inverses des trois vitesses principales a, b, c, définissent les *trois indices principaux*, n_g, n_m, n_p de la substance, pour la radiation considérée.

Lorsque le plan d'incidence d'un rayon, au lieu d'être quelconque, se confond avec l'une des *sections principales* OAB, OAC, OBC de l'ellipsoïde (fig. 275), les choses se passent différemment. Soit IO un rayon incident, contenu dans la section OAC. L'onde plane coupe l'ellipsoïde suivant une ellipse dont le plan, normal au plan IOA, doit contenir, pour ce motif, l'axe moyen OB. Par conséquent, les deux demi-axes de cette ellipse sont OB et OM, c'est-à-dire $\frac{1}{b}$ et une longueur comprise entre $\frac{1}{a}$ et $\frac{1}{c}$. Cela est vrai, quelle que soit l'inclinaison de MN sur OC. Donc, dans ce cas spécial, le rayon incident donne un rayon *ordinaire*, dont la vibration OB se propage avec une vitesse constante b et un rayon *extraordinaire*, dont la vibration OM se propage avec une vitesse variable, comprise entre a et c. Il en est de même pour les deux autres sections principales de l'ellipsoïde.

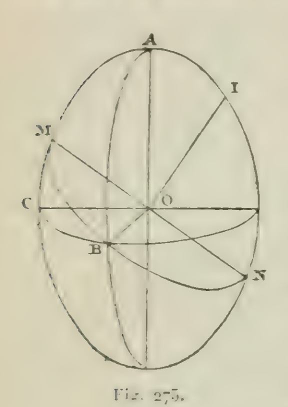


Fig. 275.

Lorsque, dans un cristal biaxe, la face d'incidence est normale à l'un des axes d'élasticité, et que le rayon est normal, par exemple suit la direction AO, ses vibrations, OB et OC, se propagent avec les vitesses b et c, et ainsi deux rayons, animés de vitesses différentes, suivent la même direction. Si la face de sortie n'est pas parallèle à la face d'entrée, les deux rayons se séparent à l'émergence.

Signe optique des cristaux biaxes. — Dans l'hypothèse où nous nous sommes placés, c'est-à-dire avec $a < b < c$, pour un rayon contenu dans la section principale AOB, perpendiculaire à l'axe de plus grande élasticité, le cristal se comporte comme un cristal uniaxe attractif, puisque la vitesse c du rayon ordinaire est plus grande que la vitesse du rayon extraordinaire. Au contraire, pour un rayon incident contenu dans la section BOC, normale à l'axe de plus petite élasticité OA, le rayon ordinaire, qui vibre suivant OA, a le minimum de vitesse, égal à a. Le cristal se comporte pour ce rayon comme un cristal uniaxe répulsif.

D'après cela, il semblerait qu'un cristal biaxe ne dût pas avoir de signe optique bien défini. On peut cependant lui en assigner un, en vertu de la convention suivante : Si les sections circulaires (revoir fig. 271) de l'ellipsoïde se rapprochent sensiblement du plan BOC, on peut dire que la surface tend vers un ellipsoïde de révolution autour de l'axe OA, avec $a < b$, ce qui donne un cristal attractif. Dans ce cas, les axes optiques, toujours perpendiculaires aux

sections principales, sont rejetés dans le voisinage de OA, qui devient leur bissectrice aiguë. Ainsi un cristal biaxe est dit attractif ou positif, quand la bissectrice aiguë de l'angle des axes optiques coïncide avec l'axe de plus petite élasticité, c'est-à-dire avec celui du plus grand indice n_g. Il serait répulsif ou négatif, dans le cas où cette bissectrice coïnciderait avec l'axe de plus grande élasticité ou du plus petit indice n_p.

Extinctions des lames cristallines. — Pour déterminer les caractères optiques des cristaux, on les taille en lames transparentes, à faces parallèles, qu'on observe au microscope, en les éclairant par-dessous, soit à l'aide de rayons parallèles, soit à l'aide de rayons convergents. Supposons qu'on se serve uniquement de lumière parallèle, dont tous les rayons atteignent la lame sous l'incidence normale.

D'après ce que nous avons dit plus haut, la combinaison, avec le microscope, d'un polariseur et d'un analyseur (ordinairement réalisée par un système de nicols) donne le moyen de reconnaître si la lame étudiée est biréfringente. Mais on peut aller plus loin et déterminer la position qu'affectent, sur le plan de la plaque, relativement à ses contours extérieurs, les directions de plus grande et de plus petite élasticité.

En effet, si la lame est éclairée avec de la lumière normale, le plan de l'onde, perpendiculaire aux rayons, se confond avec la surface même de la lame, supposée plane. C'est donc par le plan de la lame qu'il faut couper l'ellipsoïde des indices, pour avoir la section elliptique dont les axes définissent les deux vibrations réfractées. Cela posé, nous savons que toute vibration incidente doit se partager, dès qu'elle atteint la lame, en deux composantes suivant les axes de la section elliptique, qui sont justement les directions de plus grande et de plus petite élasticité dans le plan de la lame, et c'est pour cette raison, ainsi que nous l'avons précédemment indiqué, que l'interposition, entre deux nicols croisés, d'une plaque biréfringente, rétablit partiellement le passage de la lumière. Mais ce rétablissement n'a pas lieu quand les directions des axes de la section elliptique coïncident avec celles des sections principales des nicols. En effet, dans ce cas, la vibration transmise par l'analyseur devient parallèle à l'un des axes et ne donne aucune composante suivant l'autre. C'est donc comme si rien n'avait été interposé entre les nicols croisés, et l'obscurité persiste.

De là vient que, quand une lame biréfringente, éclairée par une lumière monochromatique, est placée entre deux nicols croisés, si on la fait tourner dans son plan, elle *s'éteint*, c'est-à-dire devient complètement obscure, quand ses axes d'élasticité sont parallèles aux sections principales des nicols, ce qui a lieu *quatre fois pour une rotation entière de 360 degrés*. Ainsi les *axes d'élasticité* de la plaque, ceux qui définissent ses *indices extrêmes* (que nous avons antérieurement représentés par n'_g et n'_p), sont en même temps ses *directions d'extinction* entre nicols croisés.

Or la position que ces directions occupent, relativement aux éléments cris-

tallographiques de l'espèce, varie, avec la direction de la lame, suivant des lois qu'il est aisé d'établir.

Position des directions d'extinction. Angles d'extinction. — On peut définir assez simplement la relation qui unit les directions d'extinction d'une lame cristalline avec celles de la normale à la lame et des axes optiques de la substance.

Par le centre de l'ellipsoïde des indices, menons un plan parallèle au plan de la lame. Nous aurons une ellipse qui rencontrera les deux sections circulaires de l'ellipsoïde et les coupera nécessairement suivant deux diamètres égaux. Ces deux lignes seront ainsi des *diamètres symétriques* de l'ellipse, et, par conséquent, les bissectrices de leurs angles donneront les deux axes de l'ellipse, c'est-à-dire les deux directions du maximum et du minimum d'élasticité. Cela posé, soient OA et OB (fig. 276) les moitiés correspondantes de ces diamètres symétriques. Menons, par le point O, OC normal à OA et faisons passer un plan par OC et par la normale, projetée en O, au plan AOB. Ce plan OC, perpendiculaire à OA, contiendra celui des axes optiques qui, étant normal à la section circulaire dont OA est la trace sur OAB, est, par cela même, normal à OA. De même, le plan passant par OD, perpendiculaire à OB, et la normale O, contiendra l'axe optique perpendiculaire à la seconde section circulaire. Or les deux lignes OD et OC, symétriquement placées relativement à OA et OB, forment un angle qui a la même bissectrice que AOB. Cet angle est d'ailleurs égal à l'angle dièdre des plans OC, OD, normaux à AOB. Donc on peut dire que les axes de l'ellipse sont les traces, sur le plan de la lame, des plans bissecteurs des angles dièdres qu'on obtient en menant des plans par la normale à la lame et chacun des axes optiques.

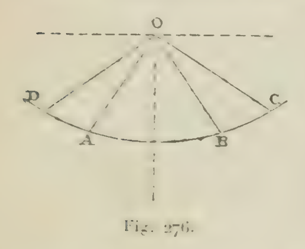


Fig. 276.

Mais chacune des deux lignes OC, OD n'est autre que la projection orthogonale de l'un des axes optiques sur le plan de la lame biréfringente. On peut donc simplifier l'énoncé qui précède, en disant que *les directions d'extinction, pour une lame donnée, sont les bissectrices des angles formés par les projections des deux axes optiques sur le plan de la lame.*

Si la lame est uniaxe, les deux lignes OC, OD se confondent en une seule, qui est précisément l'une des directions d'extinction, l'autre étant la perpendiculaire. La première, étant la projection orthogonale de l'axe optique, n'est autre que la trace de la *section principale* de la lame.

D'après cela, sachant la position que les axes optiques occupent dans chaque espèce cristalline, on peut, pour n'importe quelle face définie, calculer l'angle que les directions d'extinction doivent faire avec les lignes cristallographiques du contour de cette face. C'est ce qu'a fait M. Michel-Lévy (1), et on lui doit

(1) *Les Minéraux des roches.*

des formules qui établissent, pour chaque zone importante, les limites entre lesquelles doivent osciller les *angles d'extinction*. Par exemple, pour un cristal monoclinique d'orthose, il y a lieu de considérer surtout les zones mg^1 et pg^1. Pour la première, on établira les limites entre lesquelles doit varier l'angle de l'une des directions d'extinction avec l'arête mg^1. Pour la seconde, on pourra choisir, pour y rapporter les angles, soit l'arête mg^1, soit l'arête pg^1. Ces calculs une fois faits, et les tableaux des angles d'extinction dressés, on dispose d'un précieux moyen pour la détermination des espèces minérales. Nous verrons d'ailleurs un peu plus tard comment on peut imprimer, à la mesure des angles d'extinction, une précision suffisante, sans avoir à craindre d'hésiter pour reconnaître le moment où se produit le maximum d'obscurité.

Extinctions des lames uniaxes. — Un cristal uniaxe, taillé perpendiculairement à l'axe optique et éclairé par des rayons parallèles, reste (à l'exception des cas de polarisation rotatoire) obscur entre les nicols croisés, pour toutes les positions de la plaque.

Pour toute autre direction, la lame s'éteint quand l'un des deux axes du maximum ou du minimum d'élasticité du plan de la surface devient parallèle à l'une des sections principales des nicols, c'est-à-dire, d'après ce qui précède, quand sa section principale devient parallèle à l'une de celles des nicols.

Si la plaque est parallèle à l'axe principal cristallographique, lequel est en même temps l'axe optique, elle s'éteint quand cet axe devient parallèle à la section principale de l'un des nicols. Ainsi les faces d'un prisme, dans les systèmes sénaire, ternaire et quaternaire, doivent s'éteindre parallèlement et perpendiculairement aux arêtes verticales.

S'il s'agit des faces d'un rhomboèdre, le plan passant par l'axe optique et par la normale à une face n'est autre que le plan de symétrie, qui coupe cette face suivant la diagonale culminante. La face s'éteindra donc parallèlement à ses deux diagonales. Une face d'une proto- ou deutéropyramide hexagonale ou quadratique doit aussi s'éteindre suivant la direction de l'axe binaire auquel elle est parallèle et suivant la bissectrice de l'angle plan de son sommet.

Extinctions des lames biaxes. — Dans les cristaux biaxes, c'est-à-dire ceux des systèmes rhombique, monoclinique et triclinique, tout axe binaire est en même temps l'un des trois axes principaux d'élasticité. Sur une plaque donnée, les directions d'extinction doivent toujours être symétriques relativement aux traces des plans de symétrie (s'il y en a) sur le plan de la plaque. Quand la lame est taillée normalement à un des axes optiques de la substance, elle demeure constamment éteinte, entre les nicols croisés, si l'on emploie une lumière simple.

Pour faire apprécier l'intérêt que présente la connaissance des directions d'extinction, nous prendrons le cas d'un cristal monoclinique. Dans un tel cristal, l'un des axes d'élasticité se confond toujours avec l'axe binaire, et les deux autres, qui doivent être perpendiculaires au premier, sont nécessairement

situés dans le plan de symétrie, mais sans relation obligatoire avec les éléments de la forme cristalline. Pour déterminer entièrement les constantes optiques d'un cristal de ce système, il faut connaître l'angle que fait, par exemple avec la direction de l'arête prismatique h ou g, l'un des axes d'élasticité contenus dans le plan de symétrie, c'est-à-dire dans g^1. Il suffit pour cela de mesurer à quelle distance angulaire de l'arête h ont lieu les extinctions d'une lame parallèle à g^1.

Supposons (fig. 277) qu'un cristal monoclinique, taillé en lame suivant g^1, offre, avec la base p, deux hémidômes $a^{\frac{s}{r}}$ et $o^{\frac{s'}{r}}$, tellement disposés que l'angle de p avec $a^{\frac{s}{r}}$ soit presque égal à l'angle de p avec $o^{\frac{s'}{r}}$. La plaque différera très peu, en apparence, d'une plaque rhombique, qui présenterait la combinaison de la base p avec un dôme $a^{\frac{s}{r}}$. Mais, dans ce dernier cas, les axes d'élasticité du plan g^1 sont l'un parallèle, l'autre perpendiculaire à la base p, tandis que, dans une lame monoclinique, ces axes se croiseront suivant deux lignes obliques AA′, BB′. Par suite, l'obliquité des directions d'extinction de la lame, entre les nicols croisés, relativement au contour de la base p, fera disparaître immédiatement l'illusion produite par la symétrie de la section.

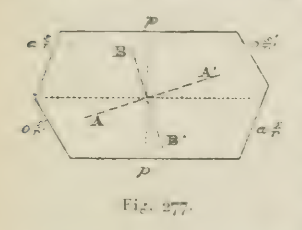


Fig. 277.

Lorsqu'un cristal monoclinique est taillé suivant l'une des faces de la zone ph^1 (c'est-à-dire la base p, le pinacoïde h^1, ou l'un quelconque des hémiorthodômes antérieurs ou postérieurs), l'une des directions d'extinction est nécessairement l'axe binaire, qui est l'axe de la zone. Donc, dans ce cas, les directions d'extinction sont liées à celles des arêtes cristallographiques, la plupart du temps parallèles ou perpendiculaires à l'axe binaire.

CHAPITRE III

PHÉNOMÈNES D'INTERFÉRENCE DES CRISTAUX BIRÉFRINGENTS

§ 1

INTERFÉRENCES DES CRISTAUX UNIAXES

Analyse des conditions de l'interférence. 1° Sections principales de l'analyseur et du polariseur parallèles. — Lorsqu'un cristal à un axe est traversé par des rayons convergents de lumière polarisée, il peut s'y mani-

fester des phénomènes d'interférence particuliers, pour l'intelligence desquels il est nécessaire d'analyser, au préalable, les conditions suivant lesquelles deux vibrations peuvent interférer (1).

Imaginons un rayon de lumière monochromatique, normal au plan du dessin (fig. 278) et dont les vibrations, polarisées linéairement, s'effectuent suivant la ligne PP′. Ce rayon rencontre normalement une lame biréfringente, dont les deux élasticités principales sont dirigées suivant AA′ et BB′, de telle sorte que la vibration incidente Op s'y décompose en deux vibrations rectangulaires Oa et Ob. Ces deux dernières, se propageant dans le cristal avec des vitesses inégales, présentent, à leur sortie, une certaine différence de marche. Supposons que, en raison de l'épaisseur de la lame, cette différence soit justement égale à une longueur d'onde de la radiation simple employée. Une particule d'éther atteinte par l'ébranlement lumineux, immédiatement à sa sortie de la lame, se trouve sollicitée, par l'une des ondes, à vibrer de O en a et, par l'autre, à vibrer de O en b.

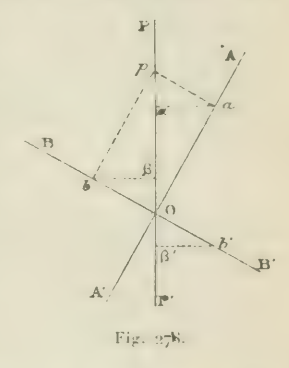


Fig. 278.

Admettons maintenant que les rayons réfractés soient reçus dans un analyseur, dont la section principale soit justement dirigée suivant PP′. Cet analyseur ne laissera passer que les composantes extraordinaires Oα et Oβ, dirigées suivant PP′, et qui se propageront dans son intérieur avec la même vitesse. Ces deux mouvements vibratoires, concordants et orientés maintenant de la même manière, se composeront en un seul; *ils interféreront à phase égale*, avec la même différence de marche qu'à leur sortie du cristal.

Au contraire, supposons que l'épaisseur de la lame soit telle, qu'elle introduise entre les deux rayons une différence de marche égale à $\frac{1}{2}\lambda$ (ou un multiple impair de cette quantité). La particule d'éther est sollicitée à la fois suivant Oa et suivant Ob'. L'analyseur laisse passer les composantes, Oα et Oβ', qui sont de sens contraire, et l'interférence a lieu *à phase opposée*, c'est-à-dire toujours avec la même différence de marche qu'à la sortie du cristal.

On peut donc dire, d'une manière générale, que deux rayons, issus par double réfraction d'un même rayon polarisé, interfèrent avec la différence de marche qu'ils possédaient à leur sortie du cristal biréfringent, aussitôt que l'interposition d'un analyseur a amené leurs vibrations à s'effectuer parallèlement à celles du rayon incident primitif.

En outre, il convient d'observer, d'une part, que la somme des composantes Oα et Oβ est constante et égale à Op (puisque O$\beta = \alpha p$); d'autre part, que les

(1) Nous suivrons surtout, dans cette analyse, les considérations exposées par M. Groth (*Physikalische Krystallographie*, p. 54 et suiv.).

composantes $O\beta$ et $O\beta'$ sont toujours égales, et d'autant plus petites que AA' est plus voisin de PP'. Ainsi l'interférence à phase égale donne naissance à une vibration d'amplitude constante, tandis que l'interférence à phase opposée, qui oblige à faire la différence de $O\alpha$ et de $O\beta'$, donne un résultat variable suivant la position de AA'. Quand AA' est à 45° de PP', on a $O\alpha = O\beta'$. Au contraire, $O\beta$ s'annule quand AA' coïncide avec PP', et $O\alpha$ s'annule quand AA' est normal à PP'.

2° **Sections principales croisées.** — Considérons maintenant (fig. 279) le cas opposé, celui où la section principale RR' de l'analyseur est à angle droit sur celle, PP', du polariseur. Deux rayons présentant une différence de marche de λ et ayant leurs vibrations suivant Oa et Ob, donneront, dans l'analyseur, les composantes extraordinaires $O\rho$ et $O\rho'$, égales et de sens contraires. Inversement, si l'épaisseur du cristal introduit une différence égale à $\frac{1}{2}$ λ, les vibrations Oa et Ob' donneront deux composantes $O\rho'$ égales et de même sens, c'est-à-dire de même phase.

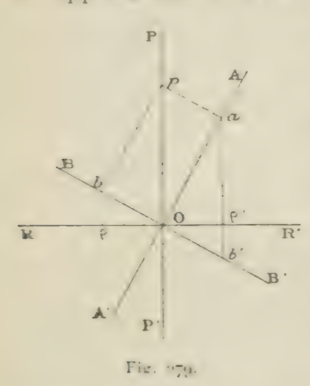


Fig. 279.

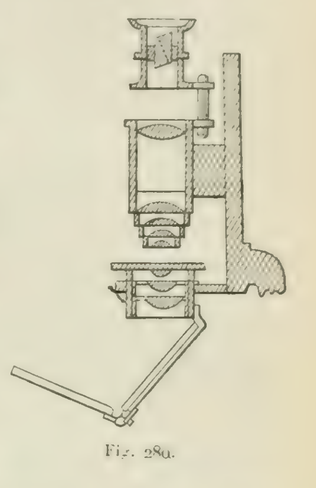
Donc, quand l'analyseur rend les vibrations perpendiculaires à celles du rayon primitif, l'interférence des rayons issus du cristal par double réfraction a lieu avec une phase opposée à celle dans laquelle ils se trouvaient à la sortie de la lame biréfringente.

On remarquera que l'interférence à phase opposée se fait ici entre deux vibrations $O\rho$ et $O\rho'$, qui sont toujours égales, quel que soit l'angle de AA' avec PP'. Au contraire, l'interférence de même phase, qui comporte l'addition de vibrations égales, dirigées suivant $O\rho'$, donne un résultat nul quand AA' coïncide, soit avec PP', soit avec RR', le maximum étant obtenu quand AA' est la bissectrice de l'angle POR'.

Lumière naturelle. Appareil de polarisation. — Si, au lieu de lumière simple et polarisée, on employait de la lumière naturelle, les choses se passeraient différemment. En effet, à un moment donné, la vibration incidente, dont l'orientation change en tournant avec une extrême rapidité, est bien parallèle à la section principale de l'analyseur ; mais, au bout d'un temps extraordinairement court, elle lui devient perpendiculaire. Il y a donc succession continue et très rapide des maxima et des minima de l'intensité lumineuse, et l'œil ne perçoit d'autre impression que celle d'une intensité moyenne constante. Telle est la raison pour laquelle les phénomènes d'interférence des cristaux biréfringents ne peuvent se manifester que si l'on emploie de la lumière préalablement polarisée.

L'appareil de polarisation à lumière convergente se compose d'abord d'un

miroir, qui renvoie la lumière à travers un prisme de Nicol, d'où les rayons viennent tomber sur un jeu de lentilles convergentes. Au-dessus de ces lentilles on place la lame biréfringente, au sortir de laquelle les rayons ont encore des lentilles convergentes à traverser, avant d'arriver à un oculaire à long foyer, que surmonte le nicol analyseur. On peut remplacer ce dernier par une tourmaline et le polariseur par une pile de glaces. La figure 280 donne une idée de la disposition adoptée par M. Em. Bertrand. L'espace vide entre le nicol et l'oculaire sert à introduire des lames cristallines, destinées à la détermination du signe optique et dont l'usage sera ultérieurement expliqué.


Fig. 280.

La pince à tourmalines fonctionne comme appareil de polarisation, lorsqu'on place les tourmalines très près de l'œil, de manière à y recevoir des rayons venus à peu près de toutes les directions. Dans ce cas, les milieux réfringents de l'œil font l'office de la lentille convergente. Cet appareil est très simple, mais il affaiblit notablement l'intensité des rayons.

Lames uniaxes normales à l'axe optique. Principe de l'interférence. — Supposons que les sections principales de l'analyseur et du polariseur soient parallèles et considérons (fig. 281) une section verticale MNPQ de la plaque, faisant avec leur direction un angle quelconque. Cette section est principale relativement à la plaque uniaxe, puisque la normale à cette plaque se confond avec l'axe optique. Nous admettrons de plus qu'on se serve d'une lumière simple.

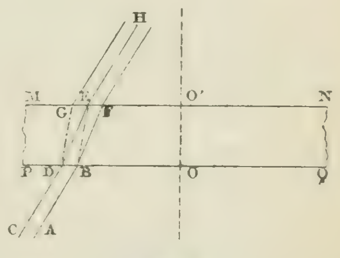


Fig. 281.

Les rayons qui traversent la plaque en son milieu sont normaux, c'est-à-dire dirigés suivant l'axe optique OO'. Ils ne subissent donc aucun changement et le milieu du champ de vision reste clair, comme s'il n'y avait aucun cristal interposé.

Soient maintenant deux rayons AB, CD, assez voisins pour qu'on puisse les regarder comme parallèles. Admettons en outre que ces rayons soient peu inclinés sur la normale, ce qui permet de négliger les changements dus à la réfraction et de considérer les vibrations comme s'effectuant sensiblement dans le plan de la lame cristalline. AB donne naissance à deux rayons, BE et BF, l'un ordinaire, l'autre extraordinaire. De même CD se décompose en un rayon ordinaire DG et un rayon extraordinaire que nous pouvons, par un choix convenable de CD, imaginer sortant de la plaque au même point E que BE. De

cette façon, les rayons, au sortir de la plaque, redevenant parallèles à leur direction primitive, nous aurons, sortant en EH, deux rayons, l'un ordinaire issu de AB, l'autre extraordinaire issu de CD, tous deux provenant de la même source. Ces deux rayons auront parcouru, dans la lame cristalline, deux chemins différents et, de plus, avec des vitesses différentes. Par suite, pour une distance convenable du point B au centre O, il arrivera que la différence de marche des deux rayons deviendra égale à $\frac{1}{2}\lambda$. Ils interféreraient donc, s'ils n'étaient pas polarisés dans des directions perpendiculaires. Mais l'analyseur, en ramenant leurs vibrations à s'exécuter dans le même plan, rend l'interférence possible. De plus, les sections principales des deux nicols étant parallèles, la différence de phase $\frac{1}{2}\lambda$ est conservée. Quant au résultat de l'interférence, il suffit de se reporter à la figure 278 pour comprendre qu'il dépend de la valeur relative des deux composantes $O\alpha$ et $O\beta'$, dont la différence est nulle quand la section principale de la lame est à 45° de celle du polariseur, tandis que c'est l'une des deux composantes qui s'annule quand les deux sections principales coïncident ou quand elles sont croisées à angle droit.

Variations de l'intensité lumineuse sur une même section. — Cela posé, soit SS' (fig. 282) la direction commune des sections principales des deux nicols et soit MN la trace, sur le plan de la plaque, de la section principale considérée. Le centre O devra être lumineux; puis la lumière ira en s'affaiblissant depuis O jusqu'en e_1, point où se réunissent les rayons pour lesquels la différence de phase est juste égale à $\frac{1}{2}\lambda$.

Fig. 282.

Au delà de e_1, on rencontrera un point l_1, pour lequel la différence de marche sera égale à λ. L'interférence aura lieu à phase égale et le point l_1 sera éclairé. Puis, en e_2, l'obscurité se produira pour une différence de $\frac{3}{2}\lambda$ et ainsi de suite, les intervalles e_1e_2, e_2e_3, e_3e_4, devenant de plus en plus petits, parce que plus les rayons sont obliques relativement à l'axe et plus la différence des chemins tels que BE et BF devient grande ; par suite, il faut d'autant moins d'écartement pour réaliser une nouvelle différence de marche de $\frac{1}{2}\lambda$. Ainsi, sur la ligne ON, on verra se succéder une série de maxima de lumière et d'extinction, de plus en plus voisins les uns des autres, à mesure qu'on s'éloigne du centre O.

Anneaux et croix blanche. — L'axe optique des cristaux uniaxes étant un axe absolu de symétrie, tous les rayons qui font le même angle avec cet axe doivent se comporter de la même façon, à quelque section qu'ils appartiennent.

Il doit donc y avoir, tout autour du centre O, des anneaux exactement circulaires, alternativement clairs et obscurs. Mais tandis que les anneaux clairs ont partout la même intensité lumineuse (l'interférence à phase égale, entre nicols parallèles, donnant un résultat constant), les anneaux noirs présentent un maximum d'obscurité à 45° de SS′ et l'intensité du noir décroît de ce point jusqu'à SS′, où il n'y a plus du tout d'extinction. D'ailleurs, pour tous les points de SS′, la vibration incidente se transmet intégralement à travers la plaque et l'analyseur, sans donner de composante normale et, par suite, la trace de SS′ doit demeurer lumineuse en tous ses points.

Enfin, si l'on considère les rayons contenus dans la section $S_1 S'_1$, à angle droit sur SS′, toute vibration incidente, dont la direction est SS′, donne une composante parallèle à SS′, qui passe tout entière, tandis que la composante normale, suivant $S_1 S'_1$, est nulle. La trace de $S_1 S'_1$ doit donc également être lumineuse.

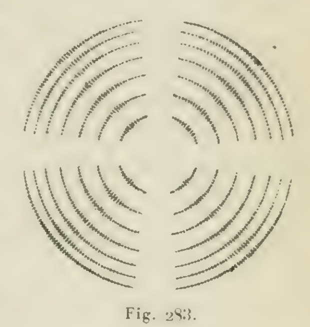


Fig. 283.

De cette façon, la figure d'interférence se compose (fig. 283) d'un centre clair, entouré d'anneaux alternativement obscurs et éclairés, d'autant plus serrés qu'on s'éloigne davantage du centre et traversés par une croix blanche. Tandis que les anneaux lumineux offrent partout, à la même distance du centre, le même degré d'illumination, les anneaux noirs présentent une obscurité qui décroit à droite et à gauche, à partir du point situé sur la bissectrice de l'angle droit des branches de la croix, en demeurant la même aux intersections des divers anneaux avec un même rayon. Pour ce motif, les branches de la croix, assez minces au voisinage du centre, s'élargissent à mesure qu'on s'en éloigne.

Anneaux et croix noire. — Passons maintenant au cas où les sections principales de l'analyseur et du polariseur sont croisées à angle droit. Le milieu du champ de vision doit rester obscur. Les rayons contenus dans la section principale du premier nicol traversent le cristal sans changement et sont totalement arrêtés par l'analyseur, à la section principale duquel ils sont perpendiculaires. Quant aux rayons contenus dans le plan parallèle à la section principale de cet analyseur, eux aussi traversent le cristal sans changement; mais leurs vibrations, parallèles à SS′, donnent une composante nulle suivant $S_1 S'_1$. De cette manière, le champ de vision doit être traversé par une croix noire, dont les branches sont parallèles aux sections principales des nicols (fig. 284).

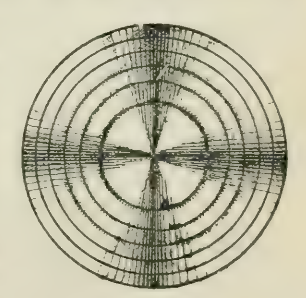


Fig. 284.

Ces sections principales étant croisées, nous savons que les interférences doivent avoir lieu avec phases opposées. La lumière se produira donc là où, dans le cas précédent, il y avait obscurité. Il y aura un cercle lumineux à la distance où se produisait le premier cercle obscur, c'est-à-dire à l'endroit où aboutissent les rayons auxquels la traversée de la plaque a imprimé une différence de marche égale à $\frac{1}{2}\lambda$.

Pour les raisons que nous avons exposées au début, l'intensité des anneaux noirs, à la même distance du centre, sera constante, tandis que l'éclairement des anneaux lumineux variera depuis un maximum, situé à 45° des branches de la croix, jusqu'à deux minima, correspondant aux intersections de l'anneau avec la croix noire. Et ainsi la croix noire ira en s'élargissant à partir du centre.

La théorie indique (1) que les rayons des anneaux noirs successifs doivent croître, à peu de chose près, comme les racines carrées des nombres pairs, tandis que ceux des anneaux lumineux de plus grande intensité sont représentés par la série des racines carrées des nombres impairs.

Lorsque les nicols ne sont ni croisés ni parallèles, le système d'anneaux est traversé par deux croix grises, dont les bras sont respectivement parallèles et perpendiculaires aux sections principales du polariseur et de l'analyseur.

Cas de la lumière blanche. Cercles isochromatiques. — La distance du premier anneau obscur au centre et, ensuite, l'écartement progressivement décroissant des anneaux successifs, sont d'autant moindres que la longueur d'onde est plus petite. Les figures d'interférence correspondant aux diverses radiations simples n'auront donc pas leurs anneaux obscurs placés aux mêmes points.

Cela posé, si, au lieu de lumière simple, on emploie de la lumière blanche ordinaire, chaque radiation simple sera éteinte à une distance du centre où les autres radiations seront seulement plus ou moins affaiblies. Il en résultera que l'anneau obscur devra se dilater et se partager en anneaux également colorés, dont chacun aura une couleur produite par l'extinction de la radiation simple correspondante. Ainsi, avec de la lumière blanche, la figure d'interférence se composera de *cercles isochromatiques*, toujours traversés par une croix blanche si les nicols sont parallèles, par une croix noire s'ils sont croisés. (Voir la planche chromolithographiée, fig. 1 et 2.)

Pour tous les cristaux connus, la longueur d'onde des radiations rouges reste supérieure à celle du violet. L'interférence est donc réalisée pour cette dernière couleur avant de l'être pour la première. Aussi le violet est-il éteint d'abord; cette extinction laisse prédominer les radiations voisines du rouge. C'est pourquoi les anneaux isochromatiques sont frangés de rouge à l'intérieur, entre les nicols croisés comme entre les nicols parallèles.

(1) Mallard, *Traité de Cristallographie*, t. II.

Relation de la figure d'interférence avec la nature des substances. — Si l'épaisseur de la plaque vient à augmenter, les rayons auront moins besoin d'être écartés du centre pour qu'il se produise une différence de marche donnée. Les courbes isochromatiques devront donc se resserrer, jusqu'à ce que leur superposition fasse disparaître l'interférence en produisant du blanc d'ordre supérieur.

Si enfin, à une plaque donnée, on substitue une plaque de même épaisseur, mais d'une substance différente, toujours taillée normalement à l'axe optique, on observe que les anneaux n'ont plus le même écartement. En effet, les vitesses de propagation des vibrations n'étant plus les mêmes, les conditions de l'interférence ne peuvent plus être réalisées aux mêmes endroits. Plus un cristal est biréfringent, et plus il y a de différence entre les vitesses du rayon ordinaire et du rayon extraordinaire ; plus, par conséquent, les anneaux y sont serrés. La calcite mérite d'être citée parmi les substances qui donnent, quand les plaques ne sont pas trop minces, des systèmes d'anneaux très serrés. Au contraire, il existe une variété d'apophyllite si peu biréfringente que, positive pour une extrémité du spectre solaire, elle est négative pour l'autre. Il y a donc une radiation intermédiaire pour laquelle l'apophyllite devient *uniréfringente*, sans être pour cela isotrope, car elle n'a cette propriété que pour une seule radiation à la fois.

Plaques obliques sur l'axe optique. — Lorsqu'une plaque uniaxe est taillée suivant une direction qui fait, avec le plan normal à l'axe optique, un angle inférieur à 25 ou 30 degrés, la figure d'interférence subsiste, mais les anneaux cessent d'être circulaires. De plus, le centre de l'image est rapproché de l'un des bords du champ de vision et les anneaux qu'on aperçoit, déjà éloignés du centre, sont très serrés les uns contre les autres. Si l'obliquité de la plaque vient à augmenter, le champ de vision ne comprend bientôt plus que la région où les extinctions des diverses couleurs se superposent et où il se produit, par conséquent, du blanc d'ordre supérieur. Tel est le motif pour lequel, à moins d'être extrêmement mince, une plaque taillée dans une direction voisine de celle de l'axe optique ne donne pas de franges d'interférence.

§ 2

INTERFÉRENCES DES CRISTAUX BIAXES

Principe des interférences dans les cristaux biaxes. — Les phénomènes d'interférence des lames biaxes offrent un intérêt spécial, lorsque ces lames sont taillées perpendiculairement à la bissectrice aiguë de l'angle des axes optiques.

En effet, si l'angle de ces axes n'est pas trop considérable, on peut recevoir dans l'œil, à la sortie de l'analyseur, des rayons qui ont traversé la plaque sui-

vant la direction même des deux axes optiques. Ces rayons ne subissant pas la double réfraction, les points de l'image où ils viennent se réunir, symétriques l'un de l'autre relativement au centre de la figure, doivent être obscurs, si les nicols sont croisés.

Les rayons réfractés subissant, dans la traversée de la lame, des retards d'autant plus grands qu'ils sont plus éloignés de la direction des axes optiques, on comprend que chacun des deux points noirs qui marquent la trace de ces axes doive être le foyer d'un système d'anneaux, alternativement clairs et obscurs en lumière monochromatique. Mais ces anneaux ne peuvent être ni circulaires ni concentriques; d'abord parce que les axes optiques ne sont pas des lignes de symétrie, ensuite parce que le plan de la lame n'est pas normal à ces axes. Le bord extérieur des anneaux est donc plus rapproché du foyer que le bord interne, du côté duquel la distance des anneaux successifs va en croissant. Bientôt, du reste, les anneaux de droite empiètent sur ceux de gauche et il en résulte des courbes en forme de lemniscates (fig. 285).

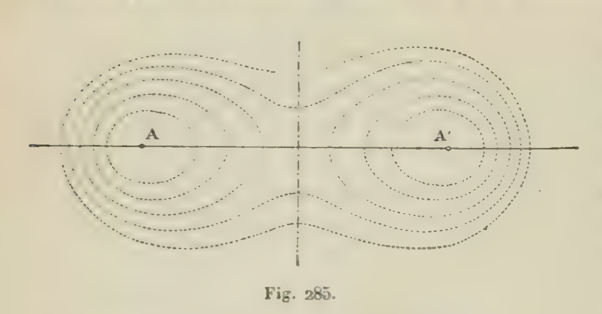


Fig. 285.

Courbes obscures. Particularités diverses. — Quelle que soit la position de la trace du plan des axes optiques, relativement aux sections principales du polariseur et de l'analyseur (supposées à angle droit), les anneaux et les lemniscates ne changent ni de forme ni de position relativement à cette trace. Mais pour chacune des situations de la lame, il y a une série de points qui restent obscurs.

La théorie (1) indique que ces points sont distribués sur deux traces de forme hyperbolique, se réduisant à un seul point lorsqu'elles rencontrent les traces des axes optiques, et s'épanouissant à mesure qu'elles s'en écartent, la partie moyenne de ces traces demeurant toujours asymptotique aux sections principales des deux nicols. La figure 286, empruntée à Mallard et relative au cas où le plan AA′ des axes optiques coïncide avec l'une de ces sections principales SS′, montre comment les deux systèmes d'hyperboles donnent, dans ce cas, naissance à une *croix noire*.

Dans la figure 287, le plan AA′ des axes est à 45 degrés des deux sections principales SS′, S_1S_1'. Dans ce cas, les deux hyperboles traversent symétriquement les deux systèmes d'anneaux. Pour toute autre position du plan des axes, les traces hyperboliques seraient obliques sur les groupes d'anneaux.

(1) Voir, dans le *Traité de Cristallographie* de Mallard (II, p. 92 et suiv.), la discussion de la forme des *courbes incolores*.

De même que pour les cristaux uniaxes, l'écartement des anneaux est d'autant moindre que la plaque est plus épaisse et plus biréfringente.

Quand les axes optiques sont très rapprochés l'un de l'autre, les deux groupes d'anneaux se confondent en un seul, de forme presque circulaire, mais avec

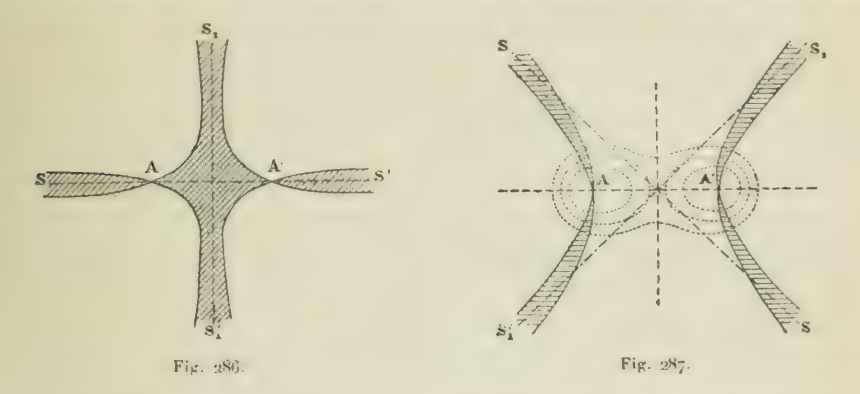


Fig. 286. Fig. 287.

deux foyers au lieu d'un centre unique. Dans certains cas, la figure se distingue à peine de celle des cristaux à un axe.

Lorsqu'une lame biaxe est taillée normalement à un axe optique, on aperçoit, entre les nicols croisés de l'appareil à lumière convergente, des anneaux concentriques qui ne sont pas circulaires et que traverse une branche noire d'hyperbole, passant toujours par la trace de l'axe optique. Lorsque la section principale de l'un des nicols est parallèle à la trace du plan des axes optiques, cette hyperbole se transforme en une droite.

Angle des axes optiques. — L'écartement des axes optiques, pour une radiation déterminée, est une des caractéristiques optiques des cristaux biaxes, et celle qui détermine, avant toute autre chose, la forme de la figure d'interférence. Il importe de savoir comment on peut arriver à la connaissance de cet écartement.

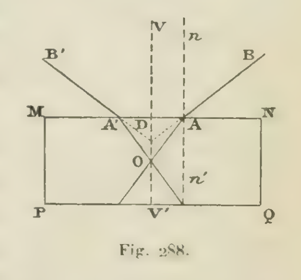


Fig. 288.

Soit MNPQ (fig. 288) la section verticale d'une plaque biaxe, taillée normalement à la bissectrice aiguë VV' de l'angle des axes optiques relatifs à la couleur avec laquelle on éclaire la plaque. Les rayons de cette couleur, qui traversent la plaque parallèlement aux axes optiques OA, OA', atteignent la surface sous des angles égaux, mais en sens opposés, et éprouvent, à leur sortie dans l'air, la même réfraction. Ils sortent donc en AB, A' B', formant entre eux un *angle apparent* BDB', qui diffère de l'*angle vrai* AOA', mais possède la même bissectrice VV'. D'ailleurs, si l'on mène la normale nn' à la surface de la plaque par le point A, l'angle nAB est la moitié de l'angle apparent.

Mais, d'après la position choisie, MNPQ est une section principale de l'ellip-

soïde d'élasticité. Les rayons OA et AB, contenus dans cette section, obéissent à la loi de Descartes et on a

$$\frac{\sin nAB}{\sin OAn'} = \frac{1}{\beta},$$

$\frac{1}{\beta}$ étant le coefficient de réfraction *moyen*, c'est-à-dire celui qui correspond aux vibrations parallèles à l'axe moyen d'élasticité. Cet indice étant supposé connu, on voit que, pour déterminer l'angle vrai, il suffit de savoir mesurer l'angle apparent.

A cet effet, on introduit la plaque cristalline dans l'appareil de polarisation et on l'oriente de telle sorte que le plan des axes optiques soit à 45° des sections principales croisées de l'analyseur et du polariseur. Le support est d'ailleurs organisé de manière à pouvoir tourner autour d'un axe qui, dans cette situation, est parallèle à l'axe moyen d'élasticité de la plaque.

Si l'on incline la plaque (fig. 289) de telle façon que le rayon émergent *ab*, issu par réfraction du rayon O*a*, parallèle à un axe optique, sorte suivant l'axe même du microscope, la trace de l'axe optique correspondant occupera le centre du champ de vision.

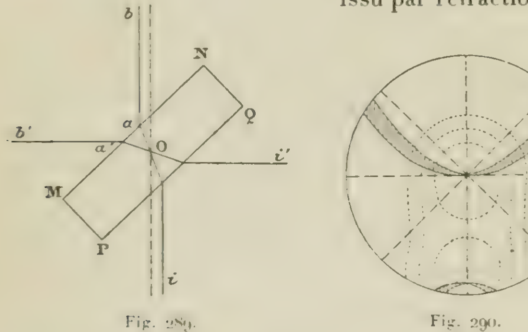


Fig. 289. Fig. 290.

L'image d'interférence apparaîtra donc dans les conditions de la figure 290, le croisement du plan des axes optiques par l'hyperbole obscure de droite coïncidant avec la croisée des fils du réticule. Si on incline la plaque jusqu'à ce que cette coïncidence soit obtenue pour l'hyperbole de gauche, il est évident que l'angle dont il aura fallu la faire tourner est le double de l'angle cherché. Cet angle se lit sur la monture de l'appareil.

Lorsque l'angle des axes optiques dépasse une certaine valeur, les rayons O*a*, O*a'* ne sortent pas de la lame, parce qu'ils y subissent la réflexion totale.

Dans ce cas, on entoure la lame d'un milieu optiquement plus dense que l'air, tel qu'une cuve à huile. C'est ce que l'on appelle mesurer l'*écartement des axes optiques dans l'huile*.

Il existe aussi des formules qui permettent de déduire l'angle des axes optiques d'une mesure de la distance qui sépare les traces de ces axes sur la figure d'interférence.

Formules relatives à l'angle des axes optiques. — On a constaté que l'angle V des axes optiques était lié à la longueur d'onde de la lumière employée

par une relation de la forme

$$V = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

pour les cristaux où l'angle des axes rouges est plus grand que celui des axes violets, et

$$V = A - \frac{B}{\lambda^2}$$

pour ceux où la relation est inverse. Si donc on a mesuré l'angle des axes pour deux couleurs déterminées, on peut calculer les constantes A et B et, connaissant la valeur de λ pour les diverses radiations, déduire de la formule l'angle relatif à ces couleurs, sans qu'une nouvelle mesure soit nécessaire.

Si 2V est la valeur de l'angle vrai des axes optiques, on peut démontrer que l'on a sensiblement, pour un cristal positif :

$$tg^2 V = \frac{n_m - n_p}{n_g - n_m},$$

et, pour un cristal négatif :

$$tg^2 V = \frac{n_g - n_m}{n_m - n_p}.$$

Cristaux biaxes taillés normalement à un axe optique. — Les cristaux biaxes, taillés normalement à un axe optique et éclairés par une lumière homogène convergente, montrent des anneaux à peu près circulaires, traversés par une branche noire dont la direction est parallèle à la trace, sur la plaque, du plan des axes optiques. La branche est rectiligne quand ce plan coïncide avec l'une des sections principales des nicols; elle se courbe, pour toute autre position, en hyperbole, dont la convexité est tournée du côté du second axe. Si la plaque n'était pas exactement normale à un axe, le centre de l'image d'interférence ne coïnciderait pas avec le centre du champ de vision.

§ 3

VARIATIONS DE LA FIGURE D'INTERFÉRENCE DANS LES CRISTAUX BIAXES

Cas de la lumière blanche. Cristaux rhombiques. — Pour une lumière simple donnée, la figure d'interférence d'une lame biaxe, normale à la bissectrice aiguë des axes optiques, est toujours (à l'exception des hyperboles noires) symétrique relativement à deux lignes rectangulaires, qui sont la trace du plan des axes et la perpendiculaire à cette trace. En effet, ces deux lignes correspondent à deux plans de symétrie de l'ellipsoïde d'élasticité.

Il en est tout autrement quand on emploie de la lumière blanche. Non seu-

lement les anneaux ne sont plus *isochromatiques*, comme ils l'étaient avec les cristaux à un axe, mais la symétrie de la figure d'interférence peut être incomplète ou nulle. Pour le bien comprendre, reportons-nous à la constitution des milieux cristallins biaxes, qui se répartissent, comme nous le savons, entre les cristaux des systèmes terbinaire, binaire et triclinique.

Dans un cristal terbinaire ou rhombique, il y a trois axes binaires, rectangulaires entre eux, avec lesquels coïncident *nécessairement* les trois axes de l'ellipsoïde optique, *quelle que soit la radiation considérée*. Mais c'est tout, et, *a priori*, il n'y a pas de raison pour que le maximum d'élasticité correspondant au rouge, par exemple, soit représenté par celui des axes qui convient au maximum d'élasticité du violet.

On peut donc bien affirmer que le plan des axes optiques (qui toujours contient l'axe de plus grande et l'axe de plus petite élasticité) sera, quelle que soit la radiation considérée, un plan de symétrie. Mais comme il y a trois de ces plans, correspondant aux faces p, g^1 et h^1, il pourrait se faire que certaines radiations ayant leurs axes optiques dans p, d'autres les eussent dans g^1 et d'autres enfin dans h^1.

En fait, les choses ne sont pas aussi compliquées et, dans tous les cristaux rhombiques connus, à l'exception de ceux pour lesquels l'angle des axes optiques est voisin de 90 degrés, *la bissectrice aiguë de l'angle des axes optiques est la même pour toutes les radiations*.

En dehors de cette exception, il ne peut y avoir d'axes optiques que dans l'un des deux plans de symétrie qui viennent se couper suivant la bissectrice en question. D'ailleurs toutes les plaques sur lesquelles devra être examinée la figure d'interférence seront parallèles à l'un des trois plans de symétrie, que ce soit p, h^1 ou g^1. Mais deux cas peuvent se présenter : ou bien *le plan des axes est le même pour toutes les couleurs* ; ou bien certaines radiations ont leurs axes optiques dans le plan perpendiculaire à celui qui renferme les axes des autres.

Dans les deux cas, la figure d'interférence d'une plaque normale à la bissectrice aiguë ne peut manquer d'être symétrique, aussi bien relativement à la ligne qui unit les traces des axes optiques que relativement à la perpendiculaire ; car ces deux lignes sont les traces de deux plans de symétrie, auxquels la plaque est normale.

Dispersion des axes. — Considérons le premier cas, qui est de beaucoup le plus fréquent, celui où les axes optiques de toutes les radiations sont situés dans le même plan.

L'angle des axes optiques dépend de la position des sections circulaires, laquelle est liée à la forme de l'ellipsoïde, c'est-à-dire à la valeur relative des élasticités principales a^2, b^2 et c^2. Ces élasticités étant variables avec les couleurs considérées, l'angle des axes ne peut être le même pour toutes les radiations. Tantôt l'angle des axes est plus grand pour le rouge que pour le violet,

ce que Des Cloizeaux exprime par le symbole $\rho > v$, tantôt c'est l'inverse et l'on a $\rho < v$.

Admettons que le premier cas soit réalisé, et exagérons, pour les besoins de la démonstration, la différence qui existe d'ordinaire entre les radiations. Sur la figure d'interférence (fig. 291), les axes rouges auront leurs traces en R et R', tandis que les traces des axes violets viendront en V et V'. Les premiers anneaux obscurs du rouge se feront donc, l'un en $r_1 r_2$, l'autre en $r'_1 r'_2$. De son côté, le violet aura ses premiers anneaux noirs, l'un en $v_1 v_2$, l'autre en $v'_1 v'_2$. De cette manière, sur les intervalles $r_2 v_2$ et $r'_2 v'_2$ s'échelonneront les extinctions des radiations successives et toute la bande $r_2 v_2$ devra être colorée, les anneaux du rouge et du violet pouvant d'ailleurs n'avoir ni la même forme, ni les mêmes dimensions. Ainsi, en cheminant à droite et à gauche à partir du centre O, par exemple de O en r_2, on atteindra d'abord, en v_2, un point où le violet est éteint. La couleur résultante, correspondant à la disparition du violet dans la lumière blanche, devra être le rouge; au contraire, en r_2, le rouge étant éteint, la couleur résultante sera voisine du bleu. Cette dernière se verra d'ailleurs beaucoup mieux que la première, la partie $r_2 v_1$ étant lumineuse. Ainsi le premier anneau, résultant de la combinaison de tous les anneaux élémentaires, dont $r_1 v_1$ et $r_2 v_2$ sont les deux extrêmes, sera, du côté du centre de l'image, frangé *de bleu à l'intérieur*, tandis que, du côté opposé, en v_1, il sera frangé de rouge.

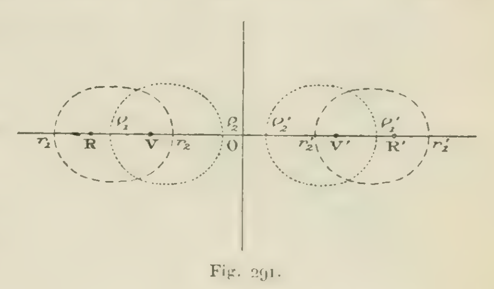


Fig. 291.

Si on avait $\rho < v$, l'anneau serait rouge intérieurement du côté du centre et bleu du côté opposé.

Ce phénomène, causé par l'inégal écartement des axes optiques, porte le nom de *dispersion des axes*.

L'existence de la dispersion des axes permet de comprendre pourquoi la bissectrice aiguë peut varier, avec les radiations, pour ceux des cristaux rhombiques où l'angle vrai des axes est voisin de 90 degrés. En effet, si l'angle est exactement égal à 90° pour les rayons jaunes, par exemple, et que l'on ait $\rho > v$, l'angle des rayons rouges sera supérieur à 90°, tandis que celui des rayons violets n'atteindra pas cette valeur. Dès lors et forcément l'axe qui fait fonction de bissectrice aiguë pour ces derniers rayons ne pourra être que la bissectrice obtuse ou normale optique des premiers.

Coloration des hyperboles. — Pour bien constater la dispersion, au lieu d'observer les anneaux, il vaut mieux placer le plan des axes à 45° des sections principales croisées de l'analyseur et du polariseur et observer la coloration des hyperboles. En effet, avec la lumière blanche, il n'y a plus un seul

système de branches hyperboliques ; il y en a plusieurs, formant une bande foncée qui s'échelonne (fig. 292) de R en V et qui, par suite, doit se franger de rouge du côté convexe, quand on a $\rho > v$, et de bleu dans le cas opposé.

La figure 293 représente la traversée, par l'hyperbole colorée, du premier anneau de gauche, dans le cas où le plan OA des axes optiques est à 45° des sections principales des nicols. On a supposé $\rho > v$. Il est aisé de se rendre compte du contraste que présentent, dans la partie centrale et lumineuse de l'anneau, la bande rouge externe et convexe de l'hyperbole et la bande concave interne de l'anneau, colorée de la couleur complémentaire, c'est-à-dire de bleu.

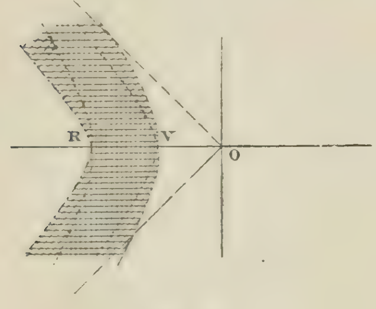


Fig. 292.

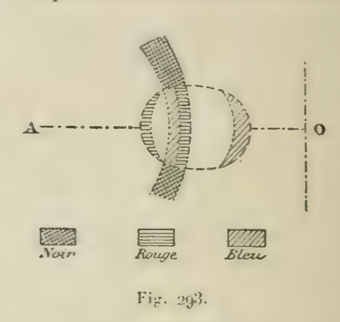


Fig. 293.

Les figures 3 et 4 de la planche chromolithographiée représentent les images d'interférence d'une lame rhombique, pour laquelle on a $\rho > v$.

Variation du plan des axes. — Dans le second cas, dont la Brookite (c'est-à-dire l'une des formes de l'oxyde de titane TiO^2) offre un exemple, les axes du rouge aboutissant en R et R' (fig. 294), ceux du jaune arrivent en J et J', beaucoup plus près du centre O. L'angle des axes diminue encore pour les radiations suivantes et il en est une pour laquelle il devient nul. A partir de ce moment, l'une des directions qui, jusque-là, avait été l'axe du maximum ou du minimum d'élasticité, devient l'axe d'élasticité moyenne. Alors l'angle des axes optiques s'ouvre dans le plan perpendiculaire au précédent, où il augmente progressivement de valeur, et les axes violets ont leurs traces en V et V'. De cette façon, si la plaque était éclairée par de la lumière ne comprenant que les radiations intermédiaires entre le jaune et le rouge, elle donnerait des anneaux et des lemniscates disposés autour des points R et R'. Si, au contraire, la lumière n'était composée que de radiations voisines du violet, les anneaux seraient disposés suivant la direction perpendiculaire, autour de V et de V'. Avec la lumière blanche, on obtient une figure complexe, résultant de la combinaison des deux systèmes rectangulaires.



Fig. 294.

Enfin, si l'on éclairait la plaque avec une lumière ne comprenant que celle des radiations dont les axes se confondent en O, on se trouverait, *pour cette radiation seulement*, dans les conditions d'une plaque uniaxe taillée normalement à l'axe et l'on verrait une croix noire avec anneaux circulaires.

Dans tous les cas, la figure qui se produit ne peut manquer, comme nous l'avons dit, d'être symétrique relativement à deux droites rectangulaires, dont l'une est la trace du plan des axes optiques.

Cristaux monocliniques. Dispersion des bissectrices. — Dans le système binaire ou monoclinique, il n'y a qu'un axe binaire, qui est l'orthodiagonale de la base rhombe, et un plan de symétrie, le plan g^1.

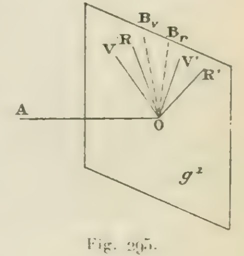


Fig. 295.

Un seul des axes des divers ellipsoïdes est donc assujetti à coïncider avec l'axe binaire. Les deux autres, toujours normaux au premier, doivent être situés dans le plan de symétrie g^1, où ils peuvent d'ailleurs occuper des positions quelconques. Ainsi les ellipsoïdes qui correspondent aux diverses radiations n'ont qu'une seule direction d'élasticité principale qui leur soit commune à tous. De là peuvent résulter des combinaisons multiples, dont trois ont une importance particulière en raison de leur fréquente réalisation.

I. *L'axe binaire coïncide, pour toutes les radiations, avec l'axe d'élasticité moyenne.*

Dans ce cas, les deux axes du maximum et du minimum d'élasticité sont contenus, pour toutes les radiations, dans le plan de symétrie. Ce plan contient donc les axes optiques relatifs à toutes les couleurs. Seulement, pour chaque radiation, ces axes ont une position spéciale.

Soient (fig. 295) OA l'axe binaire et g^1 le plan de symétrie, vu en perspective. Les axes rouges, OR et OR', ont pour bissectrice aiguë OB_r, tandis que les axes violets OV et OV' ont pour bissectrice aiguë OB_v. Les diverses bissectrices, quoique toutes contenues dans g^1, ne coïncident donc pas, ce qu'on exprime en disant qu'il y a *dispersion des bissectrices*. On ne peut plus tailler une plaque *normalement à la bissectrice aiguë* pour voir la figure d'interférence. On ne peut que tailler la plaque normalement à celle des bissectrices qui occupe à peu près le milieu de l'*aire de dispersion*. Une telle plaque est d'ailleurs normale à g^1 et fait, par conséquent, partie de la zone ph^1. Si ce n'est ni p ni h^1, ce sera un hémiorthodôme $a^{\frac{s}{r}}$ ou $o^{\frac{s'}{r'}}$.

Fig. 296.

Dispersion inclinée. — Soit B (fig. 296) la trace de la bissectrice moyenne sur le plan de la plaque et représentons par $g^1 g^1$ la trace du plan de symétrie. Évidemment la figure d'inter-

férence sera symétrique relativement à cette ligne. Supposons que la bissectrice des axes violets tombe en B_v et celle des axes rouges en B_r. Les axes violets auront leurs traces en V et V′, les autres en R et R′, et, comme la *dispersion des axes* persiste concurremment avec celle des bissectrices, l'intervalle VV′ différera de RR′. Dans la figure, on a supposé $RR' > VV'$ ou $\rho > v$, en exagérant d'ailleurs la différence habituelle de ces éléments.

On a

$$VR = BV - BR \quad \text{et} \quad V'R' = BR' - BV',$$

d'où l'on déduit :

$$V'R' - VR = BR + BR' - (BV' + BV) = RR' - VV';$$

donc V′R′ est plus grand que VR et le système des anneaux de droite est plus dilaté que celui des anneaux de gauche. La figure, symétrique relativement à g^1g^1, ne l'est plus relativement à CC′, aussi bien en ce qui concerne les dimensions des anneaux qu'en ce qui regarde leur coloration.

Cette dyssymétrie est surtout frappante, lorsqu'on place la ligne g^1 g^1 à 45° des sections principales croisées du polariseur et de l'analyseur. Dans ce cas, en effet, l'une des branches hyperboliques étant limitée par les points V et R, l'autre l'est par V′ et R′ ; elle est donc sensiblement plus large et l'œil en est encore plus frappé qu'il ne pourrait l'être de la différence des anneaux.

Ce mode de dispersion simultanée des axes et des bissectrices a reçu de Des Cloizeaux le nom de *dispersion inclinée*. Il est réalisé dans le gypse et dans le pyroxène diopside. Avec le gypse, l'angle des axes optiques est de 57° 18′ pour le rouge et de 56° 13′ pour le violet (fig. 5 de la planche).

Dispersion horizontale. — II. *L'axe binaire coïncide avec l'une des deux directions du maximum et du minimum d'élasticité.*

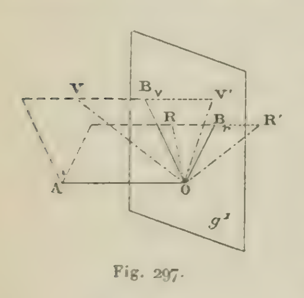


Fig. 297.

Deux cas peuvent alors se présenter, suivant que cet axe fait fonction de bissectrice obtuse ou de bissectrice aiguë.

1° L'axe binaire est *bissectrice obtuse* ou normale optique pour toutes les radiations.

Soit AO (fig. 297) cet axe et g^1 le plan de symétrie. Les bissectrices aiguës sont nécessairement dans g^1, où elles occupent des positions différentes, telles que B_r pour les rayons rouges et B_v pour les rayons violets. Il suit de là que, le plan des axes rouges étant B_rOA, celui des axes violets est B_vOA ; tous ces plans se coupent d'ailleurs suivant OA et les axes qu'ils contiennent, tels que OR et OR′, ou OV et OV′, forment des couples symétriques de part et d'autre de g^1.

Dans ce cas encore, on ne peut pas tailler de plaque normale à la bissectrice aiguë, puisqu'il y en a plusieurs ; on peut seulement, entre B_v et B_r, choisir une direction moyenne, de part et d'autre de laquelle les diverses radiations

seront à peu près également dispersées. Une plaque normale à cette direction sera d'ailleurs, comme dans le cas précédent, perpendiculaire au plan de symétrie et fera partie da la zone ph^1.

Soit B (fig. 298) le pied de la bissectrice moyenne sur une telle plaque. Le plan correspondant aura pour trace AC, tandis que les plans des axes rouges et violets seront les lignes RR′ et VV′, menées parallèlement à AC par B_r et B_v. D'ailleurs la dispersion des axes persiste et RR′ diffère en grandeur de VV′. On aura donc des anneaux compliqués, toujours symétriques relativement à la trace de g^1, mais dyssymétriques relativement à la direction perpendiculaire. Les hyperboles se correspondront bien de droite à gauche, mais les couleurs qui les frangent y seront disposées obliquement. Ce genre de dyssymétrie est la *dispersion horizontale*, offerte par l'orthose (fig. VI de la planche).

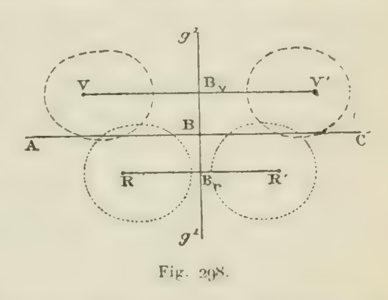


Fig. 298.

Dispersion croisée. — 2° L'axe binaire est, pour toutes les radiations, la *bissectrice aiguë*.

Alors la bissectrice obtuse se trouve dans le plan de symétrie, où d'ailleurs elle peut occuper une position quelconque. Il y a donc dispersion des bissectrices obtuses ; mais tous les plans d'axes optiques, perpendiculaires à g^1, se coupent suivant l'axe binaire. Une plaque normale à la bissectrice aiguë ne pourra être taillée, dans ce cas, que suivant le pinacoïde g^1.

Prenons le plan de cette plaque pour plan du dessin (fig. 299). Soit O le pied de la bissectrice aiguë. Les plans qui contiennent les axes optiques, tels que RR′ et VV′, passant tous par l'axe O, ont pour traces, sur le plan de la plaque, des lignes qui rayonnent autour de O. La dispersion des axes subsiste d'ailleurs et RR′ diffère de VV′. De cette manière, la figure d'interférence n'est symétrique que relativement à son centre, ce qui doit être, O étant le pied d'un axe binaire unique, qui exige simplement la substitution de V à V′, de R à R′, etc., par une rotation de 180°. Si donc SS′, S_1S_1' sont les sections principales de l'analyseur et du polariseur, la figure n'est symétrique ni relativement à ces lignes, ni relativement à toute autre droite passant par le point O.

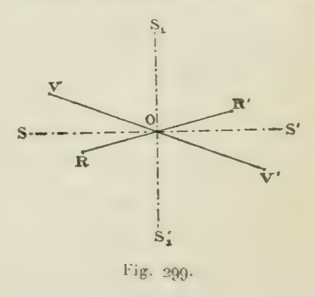


Fig. 299.

Ce mode de dispersion, réalisé par le borax, a reçu de Des Cloizeaux le nom de *dispersion croisée* ou *tournante* (fig. VII de la planche).

Cristaux tricliniques. Corps isotropes modifiés. — Dans le système triclinique, il n'existe aucun axe binaire qui puisse déterminer la position de

l'un des axes d'élasticité. Les élasticités principales peuvent donc différer, aussi bien en direction qu'en grandeur, pour toutes les radiations. Une plaque taillée normalement à l'une des bissectrices donnera une figure d'interférence dépourvue de toute symétrie. C'est ainsi que l'axinite et l'amblygonite, observées dans l'huile à cause du grand écartement de leurs axes optiques, montrent à la fois des phénomènes analogues à ceux qui caractérisent la dispersion inclinée et la dispersion horizontale (1).

Les corps isotropes, dont l'état physique a été modifié par tension ou par compression, peuvent donner des figures d'interférence plus ou moins analogues à celles des cristaux ; mais, en général, ces figures sont très irrégulières. De plus, si l'on brise la préparation étudiée en plusieurs fragments, et qu'on les observe à part, chacun d'eux présente d'ordinaire une figure spéciale. Au contraire, avec un véritable cristal biréfringent, la figure d'interférence est la même, quel que soit le point choisi pour l'observation.

§ 4

APPLICATIONS DES PHÉNOMÈNES D'INTERFÉRENCE

Mesure des angles d'extinction. Stauroscope. — Nous avons insisté précédemment sur l'importance que présente la mesure des *angles d'extinction* des lames cristallines. Mais l'appréciation du moment où se produit le maximum d'obscurité, dans l'appareil à lumière parallèle, est fort délicate et l'on peut, de ce chef, commettre des erreurs de quelques degrés. Parmi les procédés qui permettent de remédier à cette difficulté, l'un des plus classiques est l'emploi du *Stauroscope* de Kobell. Voici sur quel principe cet instrument est fondé :

Si une plaque de spath d'Islande, taillée normalement à l'axe, est interposée entre deux nicols croisés, dans un tube de faible longueur, l'œil recevant, outre les rayons qui suivent l'axe, une certaine proportion de rayons convergents, on aperçoit la croix noire et les premiers anneaux isochromatiques.

Supposons maintenant qu'entre le polariseur et la plaque de spath, on interpose une lame d'un cristal biréfringent, taillée dans une direction oblique sur l'axe ou sur les axes optiques.

La vibration incidente, sortie du premier nicol, se décompose à l'entrée de la lame suivant les deux axes de la section elliptique ; si donc ces derniers ne sont pas parallèles aux sections principales des nicols, les choses se passent comme si le polariseur et l'analyseur avaient cessé d'être à angle droit, et la

(1) Voir le Mémoire de Des Cloizeaux *sur l'emploi du microscope polarisant* (*Annales des mines*, 6e série, VI, p. 557).

croix noire disparaît. Pour la revoir (d'où le nom de stauroscope, dérivé de Σταυρός, croix), il faut tourner la lame biréfringente d'un certain angle, qu'on lit sur la graduation du porte-objet, jusqu'à ce que, les axes d'élasticité de la lame étant devenus parallèles aux sections principales des nicols, cette lame fonctionne à ce moment comme un corps isotrope, c'est-à-dire sans rien changer aux conditions de l'interférence. Si donc, au préalable, on a installé la plaque de manière qu'une de ses directions cristallographiques (arête naturelle ou arête de clivage) fût parallèle à la ligne de foi du limbe, disposée elle-même suivant la section principale de l'analyseur, on connaîtra l'*angle d'extinction* de la lame étudiée.

Le stauroscope ordinaire ne donne pas une approximation supérieure à un degré. Mais sa sensibilité peut être augmentée par certaines dispositions, dans le détail desquelles nous ne croyons pas qu'il y ait ici lieu d'entrer.

On peut aussi, et avec avantage, remplacer l'emploi du stauroscope par celui d'une *lame de Bertrand*; mais l'intelligence de ce procédé réclame la connaissance de la polarisation rotatoire. Nous n'en parlerons donc qu'un peu plus loin.

Détermination du signe optique. Cristaux uniaxes. Mica quart-d'onde. — Les phénomènes d'interférence peuvent être utilisés pour la détermination du *signe optique* des cristaux. Supposons d'abord qu'il s'agisse d'une lame uniaxe, taillée normalement à l'axe et montrant par suite, en lumière convergente, la croix noire et les anneaux.

Si, à cette plaque, on superpose une plaque d'une autre substance également uniaxe, la variation de la figure d'interférence dépendra du *signe optique* des deux substances. Supposons-les de même signe. Dans ce cas, la différence de marche, établie par la première plaque au profit du rayon ordinaire, par exemple, s'aggrave encore dans la seconde. Les choses se passent comme si l'on avait augmenté l'épaisseur de la première plaque, c'est-à-dire que les anneaux doivent se resserrer. Au contraire, si la seconde plaque est de signe opposé, elle retarde le rayon que la première avait accéléré et détruit, par conséquent, une partie de la différence de marche qui existait à la sortie de la première lame. Les anneaux doivent donc se dilater.

Comme il n'est pas commode de comparer deux figures qui ne sont entrevues que successivement, on préfère à cette méthode un autre procédé, fondé sur l'emploi d'une lame de mica.

Le mica dont on se sert pour cet usage est la muscovite, espèce biaxe fournissant, par le clivage, des lames minces qui n'introduisent, entre les rayons réfractés, qu'une différence de marche égale à un quart de longueur d'onde. Aussi leur donne-t-on le nom de *lames de mica quart d'onde*. L'épaisseur de ces lames est d'environ $0^{mm},032$. Aux nicols croisés, dans la lumière blanche parallèle, elles donneraient une teinte gris-bleu et la superposition de deux lames semblables produirait du jaune-paille.

La muscovite est biaxe et négative. Comme d'ailleurs son clivage est normal à la bissectrice aiguë, il en résulte que l'axe n_g du minimum d'élasticité est contenu dans le plan du clivage, où il est représenté par la trace du plan des axes optiques, tandis que la direction perpendiculaire correspond à l'indice moyen n_m. On taille la lame de mica en rectangle, et on s'arrange de telle sorte que le long côté de ce rectangle fasse un angle de 45° avec l'axe n_g, dont on figure habituellement la direction, à droite, sur la monture, par une flèche (fig. 300). Les nicols étant croisés, on introduit le mica quart-d'onde au-dessus de la lame uniaxe à étudier, de manière que le long côté du rectangle soit parallèle à la section principale du polariseur (auquel cas l'axe n_g du mica est à 45 degrés des sections croisées des deux nicols). L'introduction du mica disloque la figure d'interférence. Les anneaux isochromatiques se contractent dans deux quadrants opposés, s'écartent dans les deux autres. Le centre de la croix noire disparaît et deux taches noires, diamétralement opposées, se montrent de part et d'autre du centre de la figure, la ligne qui les joint étant tantôt parallèle (cristaux négatifs) et tantôt perpendiculaire (cristaux positifs) à l'axe n_g du mica.

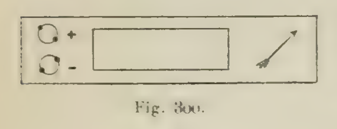


Fig. 300.

Sans entrer dans la théorie complète du phénomène, on peut facilement en faire comprendre le principe. Soient (fig. 301) AA′ et PP′ les sections principales croisées du polariseur et de l'analyseur. Quand la plaque uniaxe est seule, nous savons qu'il n'y a pas de retard de rayons en O et c'est pour cela que le centre de l'image d'interférence est obscur. Introduisons le mica, de telle sorte que ses axes d'élasticité soient On_g et On_m. Le rayon qui a traversé, suivant la normale en O, l'analyseur et la plaque uniaxe, se décompose, à la traversée du mica, en deux rayons, vibrant suivant On_m et On_g. Ces deux rayons ne se propagent pas, dans le mica, avec une égale vitesse; il se produit, à la sortie, un retard justement égal à un quart d'ondulation pour les rayons moyennement réfrangibles. Donc le centre de l'image ne correspond plus à un point de retard nul et ne peut rester obscur.

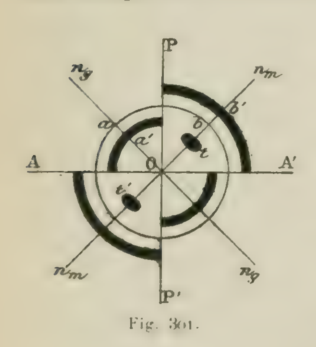


Fig. 301.

Écartons-nous maintenant du point O, dans la direction On_m et supposons que la plaque uniaxe soit positive, c'est-à-dire propage les vibrations ordinaires plus vite que les vibrations extraordinaires. Considérons, sur On_m, un point t. En ce point aboutissent, en vertu de la convergence de l'appareil, deux rayons non normaux et destinés à interférer après intervention de l'analyseur. L'un, extraordinaire, vibre à peu près suivant On_m; l'autre, ordinaire, peut être considéré comme vibrant suivant la parallèle à On, menée

par t (1). La différence des vitesses et des chemins parcourus, dans la plaque uniaxe, a mis le rayon extraordinaire en retard par rapport à l'autre. Par un choix convenable du point t, on peut faire en sorte que ce retard soit justement d'un quart d'ondulation. Mais, dans le mica, la composante dirigée suivant On_m est celle qui se propage le plus vite. Donc le retard du rayon extraordinaire s'y atténue, et précisément (ou à peu de chose près) de la même quantité. Par suite le point t, ainsi déterminé, correspond à un retard nul et doit être obscur. Au contraire, suivant On_g, le retard produit par la plaque ne peut que s'accentuer et, sur cette direction, ce qu'on trouvera d'abord, en s'éloignant de O, c'est un point a' où le retard total sera d'une longueur d'onde et où, par conséquent, devra passer le premier anneau obscur (les nicols étant croisés). Ce point sera plus rapproché de O que le point a, où passerait l'anneau s'il n'y avait pas de lame de mica ; en effet, au lieu de partir d'un retard nul, on est parti d'un retard déjà appréciable et égal à un quart d'onde.

On voit donc que, dans le cas d'un cristal uniaxe positif, le mica étant placé comme nous l'avons dit relativement au polariseur et à l'analyseur, d'abord les anneaux isochromatiques doivent se contracter de a en a' dans les quadrants que traverse l'axe n_g du mica, et se dilater de b en b' dans les quadrants opposés ; ensuite la croix noire doit se disloquer, deux taches noires t et t' apparaissant, à égale distance du centre, sur la ligne de l'indice n_m, perpendiculaire à la ligne des axes optiques de la lame quart-d'onde. Au contraire, avec un cristal négatif, la contraction des anneaux aurait lieu suivant n_m et les taches noires apparaîtraient sur la ligne n_g.

Comme, en général (et surtout dans le cas des cristaux microscopiques), la croix noire se voit beaucoup plus nettement que les anneaux, c'est le phénomène des *taches noires* qui est vraiment caractéristique de la détermination du signe optique. Aussi a-t-on coutume de reproduire, sur la monture de la lame de mica, dans sa partie gauche, les indications relatives à ces taches (fig. 300).

Emploi du quartz compensateur. — La méthode qui vient d'être indiquée ne s'applique ni aux cristaux biaxes, ni aux lames uniaxes trop épaisses pour laisser apparaître des anneaux, ou taillées parallèlement à l'axe. Il y a bien, avec la lame de mica quart-d'onde, une dislocation particulière des anneaux de la figure des cristaux biaxes; mais l'appréciation n'en est pas toujours facile. En revanche, voici un procédé qui rend de grands services :

Quand on a déterminé les deux axes d'élasticité d'une plaque cristalline, on peut se proposer de rechercher laquelle de ces deux directions correspond à la plus grande et laquelle à la plus petite élasticité. Cela permet de trancher la question du *signe optique*, soit pour une lame uniaxe parallèle à l'axe (qui est positive quand la direction de l'axe est celle du minimum d'élasticité), soit pour

(1) Ce serait tout à fait exact si les rayons aboutissant en B n'étaient pas obliques sur la plaque ; mais leur obliquité est faible.

une lame biaxe parallèle au plan des axes optiques (qui est positive quand la bissectrice aiguë coïncide avec la direction de moindre élasticité). On emploie à cet effet un *quartz compensateur*. C'est une lame de quartz taillée en coin et découpée sous la forme d'un rectangle allongé suivant l'axe principal. Le quartz étant positif, la longueur du rectangle fixe la direction du minimum d'élasticité.

Soient NN, N'N' (fig. 302) les sections principales des nicols croisés, dans l'appareil à lumière convergente. Plaçons la lame cristalline à étudier dans la situation du maximum d'éclairement, auquel cas les deux axes d'élasticité de la plaque, aa' et bb', sont à 45 degrés des sections principales des nicols. La plaque est supposée trop épaisse pour que les anneaux isochromatiques puissent s'y développer.

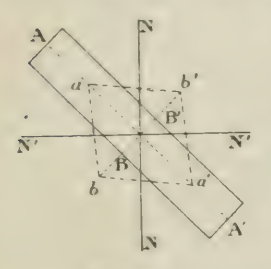


Fig. 302.

Cela veut dire que les vibrations parallèles à aa' et à bb' présentent, à la sortie, une différence de phase trop considérable, égale à $n\lambda$, n étant très grand, ce qui produit, comme on sait, du blanc d'ordre supérieur.

Introduisons maintenant la lame compensatrice de quartz et supposons que aa' corresponde au maximum et bb' au minimum d'élasticité. Dans le quartz, ce sont les vibrations parallèles à AA', c'est-à-dire à aa', qui rencontrent la moindre élasticité. Donc, à un certain moment de l'introduction du quartz, l'épaisseur correspondante produira une différence de $n'\lambda$, en sens contraire de la précédente. L'interférence, après réduction par l'analyseur, aura donc lieu avec un retard de $(n - n')\lambda$, et comme $n - n'$ peut être rendu aussi petit que l'on veut, par le déplacement du coin de quartz suivant AA', on a ainsi le moyen de faire naitre les franges d'interférence. Si, au contraire, on avait disposé AA' parallèlement à bb', la différence de marche eût été de $(n + n')\lambda$ et la figure d'interférence serait devenue d'autant moins visible.

Par suite, lorsqu'une plaque cristalline a été placée entre les nicols croisés, dans la situation du maximum d'éclairement, il suffit de disposer la lame de quartz de manière que la direction de son axe optique soit successivement parallèle aux deux axes d'élasticité de la plaque. Celle des deux positions qui fait apparaître des franges d'interférence correspond au maximum d'élasticité, c'est-à-dire au plus petit indice n'_p.

On taille souvent le quartz, comme le mica quart-d'onde, en une lame rectangulaire, où l'axe optique est à 45° de l'allongement. Il suffit donc de retourner cette lame pour changer de 90 degrés la position de l'axe optique.

CHAPITRE IV

PHÉNOMÈNES OPTIQUES DIVERS

§ I

POLARISATION ROTATOIRE

Définition du pouvoir rotatoire. — Lorsqu'une lame de quartz, taillée perpendiculairement à l'axe optique (c'est-à-dire parallèlement à la base a^1 du prisme e^2), est examinée, aux nicols croisés, dans l'appareil de polarisation à lumière parallèle, avec une lumière monochromatique, la plaque ne s'éteint pas, comme le ferait toute autre plaque uniaxe de même orientation. Les rayons passent en partie et, pour rétablir l'obscurité que le croisement des nicols aurait dû produire, il faut tourner le polariseur ou l'analyseur d'un angle déterminé.

Cela prouve que la traversée du quartz a dévié la vibration extraordinaire issue du polariseur.

Le plan de polarisation, d'abord perpendiculaire à la section principale de ce polariseur, a donc *tourné* d'un certain angle, pendant que les rayons se propageaient à travers le quartz, et ainsi ces rayons sont en état de donner, dans l'analyseur, une composante extraordinaire, qui rétablit partiellement le passage de la lumière. De là vient que ce phénomène porte le nom de *polarisation rotatoire* et que les corps avec lesquels il se manifeste sont dits doués du *pouvoir rotatoire*.

Cristaux dextrogyres et lévogyres. — Si, continuant à employer une même lumière simple, on examine successivement diverses plaques de quartz *de même épaisseur*, taillées dans des cristaux de diverses provenances, on constate que, pour rétablir l'obscurité, il faut toujours faire tourner l'analyseur *du même angle*; mais tantôt cette rotation doit s'effectuer *à droite*, c'est-à-dire dans le sens des aiguilles d'une montre, et tantôt elle doit s'effectuer à gauche.

On dit donc qu'il y a des cristaux qui *tournent à droite* le plan de polarisation, tandis que d'autres le *tournent à gauche*. Ces deux catégories de cristaux, *dextrogyres* et *lévogyres*, identiques au point de vue chimique comme sous le rapport des propriétés physiques, ne se distinguent que sur les formes capables d'être affectées par l'hémiédrie. Ainsi, quand la face rhombe, appartenant à l'hémi-isocéloèdre $\frac{1}{2}\ \{ b^{\frac{1}{2}}\ d^1\ d^{\frac{1}{4}} \}$, apparaît, seule ou accompagnée d'un hémi-scalénoèdre, comme dans la figure 303, *à droite en bas* d'une face p, on peut être

sûr que le cristal est dextrogyre. Il serait lévogyre si la même face rhombe s'observait en bas à gauche d'une face *p* (fig. 304).

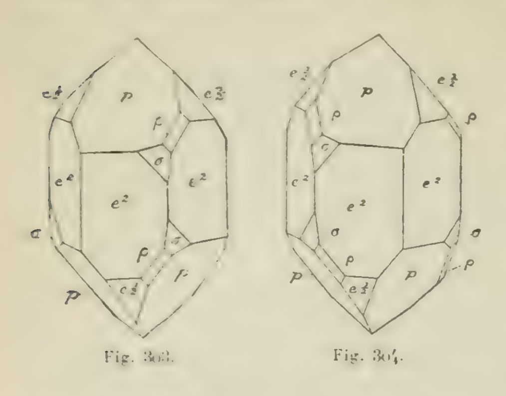


Fig. 303. Fig. 304.

Influence de l'épaisseur. Cas de la lumière blanche. Coloration des plaques. — Si l'on étudie des plaques de quartz d'épaisseur variable, on trouve que l'*intensité du pouvoir rotatoire croît proportionnellement à l'épaisseur.*

Enfin la rotation est d'autant plus grande que la longueur d'onde de la lumière employée est plus petite. Ainsi, d'après les expériences de Biot, une lame de quartz d'un millimètre d'épaisseur dévie le plan de polarisation des rayons rouges moyens de 19 degrés, tandis que le jaune subit une déviation de 24 degrés et que le violet extrême voit son plan se déplacer de plus de 44 degrés. Un accroissement d'épaisseur d'un millimètre augmente de plus de 21 degrés la déviation des rayons jaunes.

Pour ce motif, lorsqu'on emploie de la lumière blanche, on ne peut jamais amener l'extinction complète d'une plaque de quartz, aucune position de l'analyseur ne pouvant produire l'affaiblissement à peu près simultané de toutes les radiations. La plaque se colore donc, aux nicols croisés, d'une teinte mixte, variable suivant l'épaisseur. Soient AA′ et PP′ (fig. 305) les sections principales des nicols. Supposons que la rotation ait lieu à droite, dans le sens des aiguilles d'une montre, de telle sorte que, au lieu de sortir suivant OP, les vibrations du rouge extrême sortent en O*r*, celles du jaune moyen en O*j*, celles du violet extrême en O*v*. Déplaçons l'analyseur, dans le sens de la rotation, de telle sorte que sa section principale $A_1A'_1$ devienne perpendiculaire à O*j*. Les rayons jaunes, ne donnant plus de composante extraordinaire, seront complètements éteints; les radiations extrêmes domineront et il en résultera une teinte grise. Cela fait, ramenons OA'_1 vers OA′. Les extinctions se feront dans le rouge et le bleu dominera. Au contraire, écartons encore la section principale de l'analyseur au delà de OA'_1 vers OP′; l'extinction portera sur le violet et c'est le rouge qui dominera. Ainsi, pour passer *du bleu au rouge*, c'est-à-dire pour voir les couleurs se succéder dans l'ordre habituel d'énumération du spectre, il faut tourner l'analyseur dans le sens même où le cristal a produit la rotation du plan de polarisation.

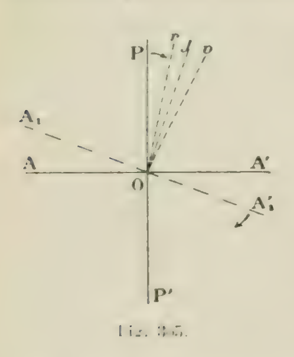


Fig. 305.

Figures d'interférence. Spirales d'Airy. — L'existence du pouvoir rotatoire fait qu'un quartz normal à l'axe, en lumière convergente, ne peut pas donner exactement la même figure d'interférence que les autres cristaux uniaxes. Le centre de l'image, au lieu d'être obscur aux nicols croisés, se colore précisément de la teinte que donnerait la plaque en lumière parallèle. Mais la polarisation rotatoire ne se produit que suivant l'axe optique. Pour toute autre direction, le quartz se comporte comme un cristal uniaxe ordinaire. Les anneaux isochromatiques doivent donc s'y développer, ainsi que la croix noire; seulement les branches de cette dernière ne se réunissent pas au centre et tout l'intérieur du premier anneau se montre uniformément coloré de la teinte mixte, qu'on fait varier en tournant l'analyseur (fig. VIII de la planche).

Si, dans le même appareil à lumière convergente, on superpose deux lames également épaisses, l'une de quartz droit, l'autre de quartz gauche, le centre de la figure redevient obscur, l'influence d'une plaque, en ce point, annulant celle de l'autre; mais les branches de la croix qui se produit se recourbent rapidement en spirales, dites spirales d'Airy (fig. 306), et le sens de la courbure fait connaître lequel des deux quartz reçoit le premier la lumière. Ainsi, quand la lumière traverse d'abord le quartz lévogyre, les branches du haut, à partir du centre, tournent leur concavité vers la gauche (I). Au contraire, l'apparence (II) indique que le quartz dextrogyre est le premier atteint par les rayons incidents.

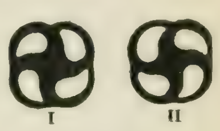


Fig. 306.

Certaines variétés naturelles de quartz sont composées de couches alternatives de quartz droit et de quartz gauche, et souvent cette composition hétérogène ne se révèle par aucun signe extérieur, de telle sorte qu'on en est averti seulement par la production des spirales.

Lame de Bertrand. — Quand un quartz est taillé normalement à l'axe, qu'il soit dextrogyre ou lévogyre, la teinte qu'il prend, sous les nicols croisés, ne dépend que de son épaisseur. M. Em. Bertrand a tiré parti de cette propriété pour construire un appareil qui permet de déterminer, avec une précision extrême, le moment de l'extinction d'une plaque mince d'un minéral. Cet appareil consiste en une lame de quartz, normale à l'axe, d'épaisseur uniforme et divisée en quatre quadrants accolés, dont deux opposés sont dextrogyres et les deux autres lévogyres. Si les nicols sont exactement croisés, la teinte doit être identiquement la même dans les quatre quadrants. La moindre variation dans l'angle des sections principales fait naître des teintes différentes. On a donc ainsi un excellent moyen de produire le croisement exact des nicols.

Ce croisement ayant été obtenu par l'interposition de la lame de Bertrand entre le polariseur et l'analyseur, on introduit une lame mince, dont on veut déterminer les directions d'extinction, et on la tourne jusqu'à ce que la lame de quartz se colore d'une teinte uniforme. En la déplaçant alors, alternative-

ment, à droite et à gauche, de manière à produire, dans deux sens opposés, une légère différence de teinte entre les quadrants, on a deux mesures d'angles, dont il suffit de prendre la moyenne.

Substances douées du pouvoir rotatoire. — Tout ce qui vient d'être dit du quartz s'applique (sauf la différence des pouvoirs rotatoires) à un certain nombre de substances uniaxes, telles que le cinabre, le sulfate de strychnine, les sous-sulfates de plomb, de potasse, de chaux, de strontiane, le carbonate de guanidine, etc.

Mais il y a aussi des substances isotropes qui tournent le plan de polarisation; seulement la rotation se fait avec la même intensité dans toutes les directions, au lieu d'être, comme dans les cristaux uniaxes, exclusivement spéciale à une direction, celle de l'axe optique. A cette catégorie appartiennent le chlorate et le bromate de soude, l'acétate de soude et d'urane. Enfin certains liquides, tels que les dissolutions de sucre et d'acide tartrique, possèdent aussi le pouvoir rotatoire.

Quoi qu'il en soit, ainsi que l'a depuis longtemps remarqué Bravais, tous les corps cristallisés qui sont doués du pouvoir rotatoire sont *hémisymétriques*, c'est-à-dire que leur polyèdre particulaire ne possède ni centre ni plans de symétrie.

Explication théorique. Reproduction artificielle du pouvoir rotatoire. — On a expliqué le phénomène de la polarisation rotatoire en démontrant qu'une vibration *rectiligne* peut être remplacée par l'ensemble de deux vibrations *circulaires* égales et de sens contraires. Si l'on admet que, d'après le sens de la rotation, les vibrations circulaires se propagent inégalement vite suivant l'axe du quartz, on trouve que le mouvement résultant équivaut à une vibration rectiligne, faisant un certain angle avec la direction des vibrations incidentes.

Quant à la vraie cause du phénomène, la théorie indique (1) qu'on peut la chercher dans la superposition d'une série de lames cristallines minces, ou d'un nombre suffisamment grand de molécules, assez dyssymétriques pour qu'on y puisse distinguer un côté droit et un côté gauche. C'est ce que confirme une expérience célèbre, due à M. Reusch (2). Cette expérience consiste à superposer en assez grand nombre (de 12 à 36) des lames de mica biaxe, d'épaisseur très faible et aussi égale que possible, en les empilant de telle sorte que le plan des axes optiques de chaque lame (à peu près perpendiculaire à la surface de clivage) fasse, dans le sens de la marche des aiguilles d'une montre, un angle de 120° avec celui de la lame immédiatement sous-jacente. On s'assure alors que cette pile de lames dévie, dans le sens indiqué, le plan de polarisation d'un rayon incident normal. En un mot elle se comporte comme une plaque de quartz dextrogyre normale à l'axe. Une superposition faite dans le sens opposé

(1) Mallard, *Comptes rendus*, 16 mai 1881.
(2) *Monatsberichte der K. Akad. d. Wissenschaften*, Berlin, juillet 1869.

produirait une rotation à gauche, et la combinaison des deux systèmes ferait apparaître les spirales d'Airy. Avec 30 lamelles, dont chacune ne produirait qu'un retard d'un huitième de longueur d'onde, on obtient le même pouvoir rotatoire qu'avec un quartz de 8 millimètres d'épaisseur.

Si l'on donne le nom de *triade* à un ensemble de trois lames consécutives, on peut s'assurer, avec M. Sohncke (1), que la rotation est d'autant plus marquée et d'autant plus indépendante de l'azimuth (angle du plan de polarisation du rayon incident avec le plan des axes optiques de la première lame rencontrée) que les lames de la triade sont plus minces ; enfin on constate que la superposition de *n* triades congruentes engendre une rotation proportionnelle au nombre des triades, c'est-à-dire à l'épaisseur de la préparation ; de sorte que, par une diminution progressive de l'épaisseur des lames, on peut concevoir des piles douées d'un pouvoir rotatoire identique en qualité avec celui du quartz et des autres cristaux actifs.

Cependant la polarisation rotatoire n'exige pas, comme condition indispensable, qu'il puisse se produire un croisement de lames biaxes. A la vérité cette condition paraît le plus souvent réalisée. M. Wyrouboff a fait la remarque que la plupart des corps doués de cette propriété présentent des anomalies optiques. Même quand ces anomalies font défaut, il est toujours possible de mettre en évidence la forme biaxe qui est l'élément de la structure de ces corps, en les faisant cristalliser dans des conditions anormales et surtout en les engageant dans des mélanges isomorphes. Dans ce cas, on constate que le pouvoir rotatoire d'un cristal est d'autant plus élevé que la biréfringence de ses éléments biaxes est plus forte. Néanmoins, le fait que des corps à l'état liquide tournent le plan de polarisation suffit à montrer que le phénomène peut être produit autrement que par une superposition de lames.

Nous avons déjà dit que, d'après Mallard, il suffisait de faire traverser à un rayon de lumière une série suffisamment nombreuses de molécules assez dyssymétriques pour offrir une droite et une gauche. Dans ce cas, c'est la constitution même de ces molécules qui déterminerait la rotation.

Relations du pouvoir rotatoire avec la nature des corps. — Cette conclusion est précisément celle qui paraît ressortir de l'étude des liquides qu'on appelle *actifs*, c'est-à-dire doués du pouvoir rotatoire.

Tout d'abord, cette étude montre que les variations de ce pouvoir, selon la nature des dissolvants, la concentration des solutions et la température, dépendent exclusivement des combinaisons que la substance est susceptible de former avec les dissolvants ; combinaisons qui, pour la plupart, donnent des corps parfaitement cristallisés, qu'on peut isoler de la solution.

Quand la substance ne peut former avec le dissolvant qu'une seule combinaison, le pouvoir rotatoire ne varie ni avec la concentration ni avec la tempé-

(1) *Poggendorff's Annalen*, Ergänzungsband VIII (1878).

rature. Si la substance admet plusieurs dissolvants, et forme avec eux plusieurs combinaisons, le pouvoir rotatoire varie avec la nature des dissolvants, la concentration et la température.

On est en droit d'en conclure, avec M. Wyrouboff (1), que la combinaison moléculaire réalisée dans la solution est la même que celle qui se produit dans le corps cristallisé correspondant, et que le pouvoir rotatoire spécifique doit être attribué à la totalité de la particule.

Toutes les substances actives à l'état liquide déploient, lorsqu'elles cristallisent, une biréfringence énergique. Mais presque toutes, une fois cristallisées, perdent le pouvoir rotatoire. Le sulfate de strychnine est un des rares corps, sinon le seul, faisant exception à cette règle. La mesure de la rotation à l'état liquide faisant prévoir un effet de 0",4 par millimètre, on observe en réalité sur les cristaux une rotation de 9 degrés. Cela ne doit pas étonner, si l'on réfléchit que, dans le liquide, les particules ne sont pas orientées, ce qui diminue les chances d'en trouver, sur une direction donnée, qui réalisent les conditions de superposition voulues.

Rôle probable des particules complexes. — En résumé, de même qu'il nous a paru que le caractère optique d'un cristal devait être déterminé par celui de la particule complexe, ainsi il semble naturel de chercher, dans cette dernière, la raison d'être du pouvoir rotatoire. Une hypothèse admissible est celle qui consisterait à imaginer, dans le cas du quartz, que les particules *fondamentales*, dont l'assemblage engendre la *particule complexe*, se groupent dans celle-ci autour d'un *axe ternaire hélicoïdal*, coïncidant en direction avec l'axe ternaire du réseau. De cette façon, les particules complexes posséderaient cette même symétrie hélicoïdale, et ainsi, suivant le mode, droit ou gauche, d'enroulement des particules fondamentales, il y aurait deux sortes de particules complexes, donnant lieu, l'une à des cristaux droits, l'autre à des cristaux gauches, et pouvant se mélanger ensemble dans un même édifice.

L'axe ternaire n'existant pas dans les particules fondamentales, celles-ci, dans l'édifice complexe, auraient des orientations différentes, mais se répétant identiquement, le long d'une rangée parallèle à l'axe, pour chaque strate de trois plans limitrophes. La particule complexe, limitée à ces trois plans, ne pourrait pas avoir de centre, ni de plan de symétrie normal à l'axe. Elle n'en aurait pas non plus suivant l'axe, puisque ce dernier contient trois sortes d'orientations de particules, et qu'un plan qui les couperait toutes trois ne pourrait être un plan de symétrie que s'il appartenait au même titre aux particules, auquel cas les orientations se confondraient. Ainsi la particule complexe serait *holoaxe hémisymétrique*, comme on sait que c'est justement le cas pour le quartz.

Conséquences de l'hypothèse. — La notion de rotation hélicoïdale,

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 6e série, t. VIII (1886), p. 340.

appliquée aux axes ternaires, revient à imaginer qu'un assemblage ternaire normal peut se composer de trois assemblages du même genre, enchevêtrés les uns dans les autres, de manière à diviser chaque strate en trois. Alors, chaque rangée parallèle à l'axe contient, d'une strate à l'autre, trois particules identiques, mais de trois orientations distinctes.

Si l'axe d'enroulement était seulement binaire, il n'y aurait plus, suivant sa direction, que deux orientations distinctes, à 180 degrés l'une de l'autre. Mallard a montré (1) que, dans ce cas, il ne pourrait pas y avoir de rotation du plan de polarisation. Ainsi le pouvoir rotatoire ne peut se manifester que dans les assemblages cristallins pourvus d'un axe cristallographique principal.

C'est ce que vérifie l'expérience, qui nous apprend que le pouvoir s'observe :

1° Dans les cristaux *sénaires ou ternaires* (Cinabre, Benzyle, Periodate de soude, Quartz, hyposulfate de potasse anhydre, hyposulfate de plomb hydraté, etc.);

2° Dans les cristaux *quadratiques* (carbonate de guanidine, sulfate de strychnine, etc.);

3° Dans les cristaux *cubiques* (chlorate de soude, bromate de soude, alun d'amylamine, etc.).

Toujours, d'ailleurs, quand la forme cristalline s'y prête, on peut s'assurer que la particule complexe est réellement holoaxe hémisymétrique.

Remarquons seulement que, dans les corps à réseau cubique, les axes hélicoïdaux sont multiples et forment des systèmes conjugués. C'est pourquoi, à la différence des cristaux à axe principal, où la polarisation rotatoire ne se manifeste que pour les rayons parallèles à cet axe, dans les cristaux cubiques le phénomène a lieu, comme le montre l'expérience, quelle que soit la direction des rayons.

§ 2

POLARISATION CHROMATIQUE

Interférences dans les lames minces. — Supposons qu'une *lame mince* d'un cristal uniaxe ou biaxe, taillée dans une direction qui ne soit pas normale à un axe optique, vienne à être interposée entre deux nicols croisés, dans l'appareil à lumière parallèle.

Le rayon extraordinaire, sorti du polariseur, tombe normalement sur la lame et sa vibration s'y décompose suivant les deux axes de la section elliptique. Mais les deux vibrations composantes se propagent avec des vitesses inégales. Concordantes à l'entrée, elles ne le sont plus à l'émergence et présentent une

(1) *Traité de Cristallographie*, II, p. 318.

certaine différence de phase. D'ailleurs, en raison du peu d'épaisseur de la lame, les deux rayons correspondants ne se séparent pas à la sortie. Ces deux rayons seraient donc dans les conditions voulues pour interférer, si leurs vibrations n'étaient pas rectangulaires. En ne laissant passer, de ces vibrations, que les composantes parallèles à sa section principale, l'analyseur rend l'interférence possible et, suivant que la différence de phase correspond à un nombre impair ou à un nombre pair de demi-longueurs d'onde, il se produit, avec la radiation simple employée, un maximum ou un minimum de lumière.

Lorsqu'on se sert de la lumière blanche, comme les diverses radiations qui la composent ont des longueurs d'onde différentes, la traversée de la plaque mince produit sur ces radiations des effets qui sont loin d'être identiques. Pour les unes, elle introduit une différence de phase qui détermine leur extinction totale. D'autres, au contraire, sont amenées à des états vibratoires concordants et celles-là doivent présenter un maximum d'éclat. Ainsi les diverses radiations ne concourent plus à la composition de la lumière émergente dans les mêmes proportions que pour le faisceau incident. Le faisceau émergent est donc *coloré*. Tel est le phénomène connu sous le nom de *polarisation chromatique*.

Teintes de polarisation. — Pour que la coloration se produise, il faut que la lame soit très mince ; autrement sa traversée introduirait des différences de phase égales à un grand nombre de demi-longueurs d'onde, auquel cas, l'interférence portant sur beaucoup de radiations à la fois, il se produirait du *blanc d'ordre supérieur*. Mais il ne faut pas non plus que la lame soit par trop mince ; car les radiations affectées seraient en trop petit nombre pour agir sur la lumière émergente. En général, l'épaisseur des lames qui manifestent des teintes de polarisation très vives est une petite fraction de millimètre (par exemple de un dixième à un centième).

Une lame cristalline trop mince pour retarder sensiblement l'un des rayons émergents reste noire entre les nicols croisés. Si son épaisseur augmente progressivement, sa teinte passe par le gris de fer, puis le gris bleu, arrive au blanc, ensuite au jaune, au jaune orangé, au rouge, au rouge pourpre et finit par atteindre le *violet*. Au delà, l'indigo et le bleu se manifestent, pour faire bientôt place au vert, après lequel revient la succession du jaune, de l'orangé et du rouge, terminée par l'apparition d'un nouveau *violet*, teinté de *bleuâtre*. Ces teintes violettes, plus faciles à noter au passage, à cause de leur contraste avec les nuances qui précèdent et celles qui suivent, portent le nom de *teintes sensibles* et l'on appelle *lame sensible* une lame qui les fait naître.

La première teinte rouge, dite rouge du *premier ordre*, exige, pour se produire, des plaques très différemment épaisses suivant les substances. Cette teinte se manifeste avec une lame de spath d'Islande de $0^{mm},00293$, tandis que, pour l'épidote, l'épaisseur serait 0,0144 et, pour la tourmaline, 0,0317. La topaze exige 0,059, le quartz 0,0605, l'orthose 0,0791, l'apatite 0,124, l'idocrase 0,266 et la pennine 0,554.

Les teintes du quatrième ordre sont déjà très peu vives et au delà se produit le blanc d'ordre supérieur.

Application de la polarisation chromatique à l'examen minéralogique des roches. — Grâce aux phénomènes chromatiques, une lame mince d'une roche, examinée au microscope polarisant, en lumière parallèle, se pare de couleurs qui aident puissamment à la détermination des espèces minérales dont elle se compose.

En effet, pour une substance donnée, la teinte de polarisation, dépendant de la différence des vitesses de propagation des deux vibrations, varie : 1° avec la

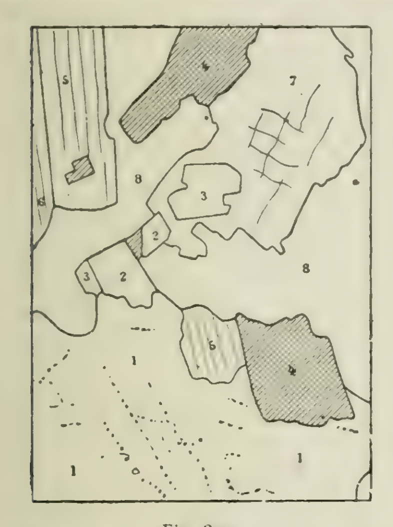


Fig. 307.

Plaque de granite de Vire (d'après M. Michel Lévy). — 1, quartz en grandes plages ; 2 et 3, quartz en cristaux isolés ; 4, mica ; 5 et 6, oligoclase ; 7, cristal d'orthose ; 8, orthose en grandes plages.

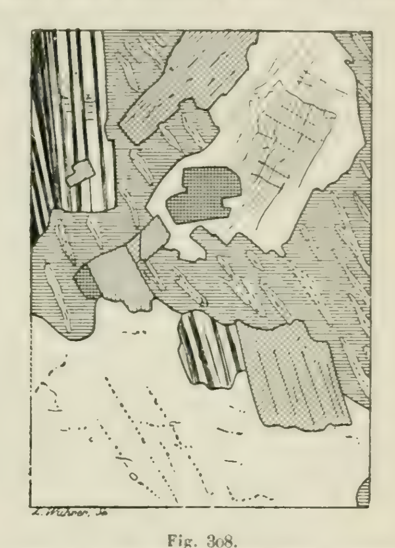


Fig. 308.

Plaque de la figure 307, vue entre les nicols croisés. — Grossissement des deux figures, 80 diamètres. — Les couleurs de polarisation sont remplacées par des hachures conventionnelles.

lumière employée ; 2° avec l'épaisseur de la lame ; 3° avec la valeur relative des deux axes de la section elliptique déterminée par le plan de la lame, c'est-à-dire avec l'orientation de ce plan relativement aux éléments cristallographiques du corps. Ainsi, deux cristaux d'un même minéral, rencontrés, suivant des orientations différentes, par une même lame taillée dans une plaque de roche, s'éclaireront, dans le champ de vision, de teintes différentes. Tel est le cas des lamelles, accolées suivant deux orientations alternantes, qui composent beaucoup de cristaux de feldspath. Au contraire, on reconnaîtra, dans une plaque de roche, les éléments de même orientation (par exemple les petits cristaux alignés de quartz des pegmatites graphiques), à l'identité de leurs teintes dans le champ de vision.

Les figures 307 et 308, où des hachures conventionnelles remplacent les teintes de polarisation, donnent une idée de la différence d'aspect d'une

plaque mince de roche, suivant qu'elle est vue en lumière ordinaire ou observée entre les nicols croisés. Dans ce dernier cas, non seulement les apparences chromatiques définissent beaucoup mieux les contours des divers minéraux ; mais encore elles mettent en évidence, soit la structure compliquée de certains cristaux, simples en apparence, soit l'identité d'orientation de plusieurs fragments isolés.

Variation des teintes. — Une plaque d'un minéral étant donnée, si, les nicols restant croisés, on fait tourner la plaque dans son plan, sur le porte-objet, elle doit s'éteindre chaque fois que l'un des axes de sa section elliptique devient parallèle à l'une des sections principales des nicols. Pour les positions intermédiaires, la différence de marche des rayons demeurant la même, les composantes transmises dans l'analyseur sont toujours égales entre elles (1) ; leur valeur absolue seule est variable, ce qui modifie l'intensité, mais non la couleur de la lumière ; par conséquent, la teinte de polarisation, sans changer de nature, passe par quatre maxima et quatre minima d'intensité.

Il en est tout autrement quand, la plaque restant fixe, ainsi que l'un des nicols, on imprime à l'autre une rotation autour de l'axe vertical de l'instrument. En effet, quand les sections principales des nicols sont devenues parallèles, nous savons que l'interférence qui, pour les nicols croisés, se faisait avec une phase opposée à celle de la sortie de la lame, s'opère maintenant à phase égale. Celles des couleurs qui se trouvaient affaiblies dans le cas précédent sont au contraire renforcées et, par suite, la lame, entre les nicols parallèles, offre une teinte *complémentaire* de celle qu'elle avait précédemment. Pour les positions intermédiaires, la teinte de la plaque doit varier constamment entre ces deux limites, la valeur absolue et le sens des composantes de l'interférence changeant d'une manière continue avec l'angle des sections principales des nicols.

§ 3

PHÉNOMÈNES DE COLORATION. POLYCHROISME

Définition de la couleur des cristaux. — Les phénomènes de coloration que présentent les cristaux peuvent tenir à leur nature même ou à l'interposition visible d'une certaine quantité de matériaux étrangers. Ainsi les cristaux rouges de quartz, dits hyacinthes de Compostelle, ont enfermé dans leur masse des particules, distinctes à l'œil nu, d'oxyde rouge de fer. Nous ne nous occuperons ici que du premier cas, celui des colorations qui ne résultent pas du mélange accidentel d'espèces minérales distinctes et qui, si elles n'appartiennent pas en propre au minéral considéré, ont du moins pour cause

(1) V. plus haut, p. 254.

une matière si finement disséminée dans la masse du cristal, qu'on ne saurait dire bien souvent si elle y existe à l'état de mélange ou sous forme de combinaison chimique.

Un certain nombre de cristaux ne réfléchissent pas également toutes les couleurs; la lumière qui les frappe subit, dans les couches externes du corps, une absorption qui varie avec la nature des radiations. Ce phénomène est surtout marqué avec les substances métalliques, qui peuvent offrir une grande variété au point de vue de la teinte et de l'éclat.

Il existe aussi des cristaux non métalliques qui se colorent, sous l'influence de la lumière réfléchie, d'une teinte différente de celle qu'ils présentent quand on les regarde par transparence. Nous laisserons de côté ces phénomènes superficiels, quelque intéressants qu'ils puissent être, pour ne nous occuper que de la coloration de la lumière transmise, et nous ne ferons que mentionner la propriété que possèdent certains cristaux, sans doute parcourus par de fines cavités intérieures, de laisser apercevoir à leur surface des figures lumineuses en forme d'étoiles (astérisme du saphir et de certains micas).

Absorption de la lumière transmise. Couleurs propres des cristaux. — La lumière, en pénétrant dans l'intérieur des corps, subit d'abord un affaiblissement d'*intensité*, qui marque l'absorption, par la matière, d'une partie de la force vive du mouvement lumineux. Si cette absorption est très faible, le corps est dit *transparent*; si elle est considérable, il est dit *opaque*.

Mais cette absorption peut se faire sentir différemment sur les diverses espèces de radiations. Si la différence est assez faible pour que la lumière transmise soit composée, à peu de chose près, comme la lumière incidente, le corps est dit *incolore*. Il n'y a pas, en réalité, plus de substances incolores qu'il n'y en a d'absolument transparentes, et il suffit d'imposer à la lumière un trajet suffisamment long pour que, au sortir d'un corps quelconque, elle offre une certaine teinte. Mais on réserve la qualification de corps *colorés* à ceux qui produisent cet effet même en tranches relativement minces. Beaucoup de ces corps n'absorbent que certaines radiations déterminées : si donc on reçoit, sur un prisme, la lumière qui les a traversés, on obtient un *spectre d'absorption*, où les radiations conservées se détachent en bandes brillantes sur un fond obscur.

La couleur qu'une substance imprime, par absorption, à la lumière transmise, s'appelle *couleur propre* du corps. Cette couleur n'est pas, en général, une conséquence nécessaire de la composition de l'espèce minérale qui la présente ou, du moins, elle peut être déterminée par des substances qui ne figurent pas au nombre des éléments constituants de l'espèce. Ainsi la topaze, sans cesser d'être un silicate d'alumine fluorifère, avec une forme cristalline bien définie, peut être jaune, comme en Saxe et au Brésil, ou bleuâtre, comme en Sibérie. L'émeraude est tantôt verte, tantôt jaune, tantôt absolument incolore; le quartz peut être hyalin, violet ou enfumé; enfin le corindon est bleu avec le saphir et rouge avec le rubis. Or l'analyse chimique montre que ces colorations

sont dues, dans certains cas, à une petite proportion d'oxydes métalliques, tels que l'oxyde de chrome et, dans des cas plus nombreux encore, à des substances volatiles, probablement hydrocarbonées, qui ne jouent aucun rôle dans la constitution de l'espèce minéralogique (1).

Rapports de l'absorption avec la direction des vibrations. Polychroïsme. — Dans un cristal homogène, le mélange du principe colorant avec la matière du cristal est assez intime pour que la distribution de ce principe soit assujettie aux lois qui règlent la disposition des particules cristallines. Il en résulte que l'absorption colorée de la lumière, c'est-à-dire l'affaiblissement inégal des diverses radiations du faiseau incident, est l'un de ces phénomènes physiques qui, dans les cristaux, sont ordonnés conformément aux directions.

Par suite, la couleur propre d'un corps, vu par transparence, ne peut être la même, pour toutes les directions de transmission, que si la propagation des vibrations lumineuses est indépendante de leur orientation, c'est-à-dire si le corps est isotrope. Dans un tel milieu, l'absorption ne dépend que de l'épaisseur, et toutes les plaques également épaisses d'un même corps offrent la même teinte, dans quelque direction qu'elles aient été taillées.

Il en est tout autrement dans les milieux biréfringents. L'absorption de la force vive du mouvement lumineux étant nécessairement liée à la nature même de ce mouvement, et les vibrations se propageant inégalement vite suivant les directions, on conçoit que l'intensité et la nature de la lumière transmise doivent varier avec le sens dans lequel des plaques cristallines de même épaisseur ont été taillées relativement aux élasticités principales de la substance. Les cristaux biréfringents colorés sont donc essentiellement caractérisés par la propriété d'offrir des colorations variables suivant les directions, propriété qui a reçu les noms de *pléochroïsme* et de *polychroïsme*.

Le polychroïsme a été remarqué d'abord sur les cristaux de *cordiérite* ou *dichroïte*. Cette substance (qui est un silicate d'alumine avec oxyde ferrique et magnésie) se montre d'un beau bleu dans un certain sens et offre une teinte grise dans le sens perpendiculaire au premier.

Il importe de ne pas confondre ce phénomène avec la *double coloration* que présentent certains cristaux. Ainsi on trouve en Angleterre des cristaux cubiques de fluorine, qui sont d'un bleu intense sous l'influence de la lumière réfléchie et d'un beau vert quand on les regarde par transparence. La première couleur, produite par réflexion, est indépendante de la direction des vibrations, tandis que le véritable polychroïsme résulte de l'inégale absorption que subissent, dans les cristaux biréfringents, les deux vibrations, polarisées à angle droit, auxquelles donne lieu toute vibration incidente.

Le polychroïsme demande à être étudié successivement dans les cristaux uniaxes et dans les cristaux biaxes (2).

(1) Jannettaz, *Bull. Soc. géol. de France*, 2e série, XXIX, p. 300.
(2) Nous suivrons, dans cette étude, le *Traité de Cristallographie physique* de M. Groth.

Polychroïsme des cristaux uniaxes. — Dans un cristal uniaxe, les rayons qui traversent le cristal suivant la direction de l'axe éprouvent une absorption déterminée, qui dépend de la nature de la substance. Appelons A la couleur que produirait cette absorption, pour une épaisseur déterminée de la lame cristalline. Nous savons qu'en pareil cas les vibrations, étant normales à l'axe optique, rencontrent la même élasticité, quelle que soit leur direction. L'absorption qui produit la teinte A est donc indépendante de la polarisation du rayon incident.

Imaginons maintenant une lame de même épaisseur, mais taillée parallèlement à l'axe et frappée par des rayons normaux. La vibration incidente se décomposera en deux, l'une parallèle à l'axe, l'autre perpendiculaire. Cette dernière, quelle que soit sa direction, donnerait lieu, si elle était seule, à la production de la teinte A. La première en donnerait une autre, que nous appellerons B et qui est certainement, parmi toutes les teintes d'absorption que peut offrir le cristal sous une épaisseur donnée, celle qui diffère le plus de A. En effet, c'est suivant l'axe optique et la direction normale que les élasticités optiques sont le plus différentes.

En résumé, le cristal étant vu par transparence, les deux rayons polarisés à angle droit arriveront ensemble à l'œil et il en résultera l'impression d'une teinte mixte, que nous pouvons représenter par AB. Les deux teintes A et AB seront d'autant plus distinctes que A et B différeront davantage. Pour toute autre direction de la plaque, la couleur serait intermédiaire entre A et AB, et d'autant plus voisine de A que la direction des rayons serait plus rapprochée de celle de l'axe optique.

On voit par là combien il est peu correct de désigner ce phénomène, comme on le fait souvent, sous le nom de *dichroïsme*, puisque, même avec un cristal uniaxe, il y a, en réalité, une infinité de teintes possibles. Seulement, en général, le polychroïsme des cristaux est peu marqué et il n'y en a pas beaucoup qui, observés à la vue simple, laissent apercevoir une différence sensible entre les teintes A et AB.

Loupe dichroscopique. — Pour rendre le polychroïsme appréciable, il faut pouvoir isoler les teintes A et B, en juxtaposant les images produites par chacune d'elles. C'est ce que réalise la *loupe dichroscopique* d'Haidinger.

Un prisme de spath *abcd* (fig. 309) est fixé dans une monture en laiton, de telle sorte que sa section principale contienne l'axe de la monture. En avant et en arrière du spath sont placés deux coins de verre, *v* et *v'*, de façon que les rayons soient normaux aux faces d'entrée et de sortie. Enfin une lentille *l* est appliquée contre le prisme *v*, tandis que,

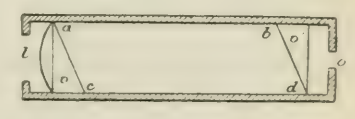


Fig. 309.

en arrière de *v'*, est pratiquée une ouverture rectangulaire *o*. Les dimensions du spath ont été réglées de telle manière que les deux images fournies par la

double réfraction et agrandies par la lentille apparaissent exactement juxtaposées par un de leurs bords.

Supposons qu'une lame cristalline uniaxe, taillée parallèlement à l'axe, soit tenue devant l'ouverture o, la direction de l'axe de la lame étant parallèle à la section principale du spath. Toute vibration incidente tombant sur la lame s'y décompose en deux, l'une ordinaire, normale à l'axe, la seconde extraordinaire, parallèle à l'axe. Or la première ne peut donner, en traversant le spath, aucune composante parallèle à la section principale, tandis qu'elle s'y transmet *intégralement* à titre de vibration ordinaire. Elle concourt donc seule à la formation de l'image ordinaire de l'ouverture. Au contraire, l'image extraordinaire est *exclusivement* fournie par les vibrations extraordinaires issues de la lame et intégralement transmises par le spath, à la section principale duquel elles sont parallèles. Dès lors, tandis que la première image est colorée de la teinte A, la seconde offre la teinte B, et il suffit que ces deux teintes soient un peu différentes, pour que leur juxtaposition permette d'en saisir le contraste.

Si la plaque n'était pas parallèle à l'axe, elle produirait, lorsque l'un de ses deux axes d'élasticité viendrait à coïncider avec la section principale du spath, deux teintes A et B', moins différentes l'une de l'autre que A et B. Enfin une plaque normale à l'axe donnerait deux images de même teinte A. Aussi cette teinte A (qui est celle des lames parallèles à p dans les systèmes hexagonal et quadratique et à a^1 dans le système ternaire) s'appelle-t-elle *couleur de la base*, tandis que B est la *couleur propre de l'axe*.

Exemples de polychroïsme dans les cristaux uniaxes. — Voici quelques exemples des teintes que donnent les substances uniaxes les mieux pourvues de polychroïsme :

ESPÈCES	A COULEUR DE LA BASE	B COULEUR DE L'AXE
APATITE DE SCHLAGGENWALD	Vert de montagne	Bleu
MICA DU VÉSUVE.	Vert pistache	Brun de cannelle
CHLORITE DU ZILLERTHAL.	Id.	Id.
SAPHIR.	Bleu de Prusse	Blanc verdâtre
ÉMERAUDE DU PÉROU.	Vert jaunâtre	Vert pur
BÉRYL DU BRÉSIL.	Id.	Vert bleuâtre
ZIRCON.	Brun de girofle	Vert jaunâtre

D'après les recherches d'Haidinger et de Babinet, des deux rayons produits par la biréfringence dans les cristaux uniaxes, c'est celui qui est le plus fortement dévié qui subit l'absorption la plus considérable. Ainsi, dans les cristaux attractifs, c'est le rayon extraordinaire. On peut donc dire que l'absorption est d'autant plus forte que la vitesse de propagation des vibrations est moindre.

La tourmaline étant un cristal négatif, c'est le rayon ordinaire qui s'y pro-

page le moins vite et qui, par suite, est le plus rapidement absorbé. C'est dans une plaque parallèle à l'axe que la différence d'absorption des deux rayons sera le plus considérable pour une épaisseur donnée.

Polychroïsme des cristaux biaxes. — Dans les cristaux biaxes, il y a trois directions principales d'élasticité, qui sont celles des trois axes de l'ellipsoïde. Une lame biaxe d'épaisseur donnée pourra donc offrir, si l'on sépare les images, trois *couleurs principales* ou *couleurs d'axes* A, B, C, suivant celui des trois axes d'élasticité normalement auquel elle aura été taillée. La loupe dichroscopique permettra d'isoler ces teintes et de les distinguer.

Si, sans le secours de la loupe dichroscopique, on se contente d'examiner, à la vue simple, des lames taillées normalement aux trois axes d'élasticité, on aura, non plus les *couleurs d'axes* A, B, C, mais les *couleurs de faces* BC, AC, AB. Enfin, avec des lames taillées dans des directions quelconques, on obtiendrait des couleurs intermédiaires. Voici quelques exemples des teintes offertes par les cristaux les plus fortement polychroïques :

ESPÈCES	COULEURS DE FACES			COULEURS D'AXES		
	BC	AC	AB	A	B	C
CORDIÉRITE *ou* DICHROÏTE	Beau bleu	Bleu pâle	Gris jaunâtre	Gris tirant sur le jaune	Gris bleuâtre	Bleu foncé pur
ANHYDRITE D'AUSSEE	Bleu violacé pâle	Bleu violacé pâle	Bleu violacé pâle	Bleu violet	Jaunâtre	Bleu violet très pâle
DIASPORE DE SCHEMNITZ	Bleu de Prusse	Bleu violet	Vert d'asperge	Bleu de ciel	Jaune vineux	Bleu violet
TOPAZE DU BRÉSIL	Jaune miel rougeâtre	Jaune vineux	Jaune miel pur	Jaune vineux	Jaune miel	Jaune paille
PÉRIDOT	Vert pistache	Vert pistache	Vert pistache	Vert d'huile	Vert d'herbe	Vert pistache pâle

L'amphibole offre aussi un polychroïsme énergique. En général, les vibrations parallèles à l'axe de plus grande élasticité donnent une couleur verte, tandis que celles qui suivent l'axe de plus petite élasticité produisent une teinte brune. Dans toutes les amphiboles, les axes optiques sont contenus dans le plan de symétrie. C'est donc une plaque parallèle à g^1 qui offrira le maximum de polychroïsme.

Observation du polychroïsme dans les plaques minces. — L'appareil de polarisation à lumière parallèle donne un moyen facile de constater le poly-

chroïsme des minéraux taillés en plaques minces. Si on enlève l'analyseur et qu'on fasse tourner, soit la plaque dans son plan, soit le polariseur dans sa monture, chaque fois que la section principale de ce dernier sera parallèle à l'un des deux axes d'élasticité de la plaque, cette dernière ne transmettra que des vibrations dirigées suivant cet axe et, par suite, faisant naître la teinte qui lui est propre. Si donc le polychroïsme est marqué, on verra la teinte varier quatre fois pour une rotation de 360 degrés, en donnant deux fois la couleur de l'un des axes et deux fois celle de l'autre. L'amphibole se décèle assez bien de cette manière, même sur des plaques très minces, par la variation de sa teinte, qui peut passer du vert au brun.

On pourrait, enlevant le polariseur, se contenter de faire tourner l'analyseur; car l'effet est le même, qu'on éloigne par réflexion totale un des deux rayons qui ont traversé la lame ou qu'on n'y laisse arriver que des vibrations d'orientation déterminée. Mais la lumière qui frappe une lame cristalline, après réflexion sur un miroir, est partiellement polarisée par le seul fait de cette réflexion. L'emploi de l'analyseur risque donc d'introduire des teintes d'interférence, qu'on peut confondre avec celles que fait naître le polychroïsme. Aussi la première méthode est-elle préférable.

Houppes des cristaux biaxes. — Lorsqu'on tient, tout près de l'œil, un cristal biaxe fortement coloré, taillé en plaque normale à un axe optique, on observe la production de deux houppes obscures, limitées par deux courbes hyperboliques, dont l'axe est la trace même du plan des axes optiques. La même chose a lieu quand, éclairant la plaque avec des rayons convergents, on la regarde par le tube du microscope, après avoir enlevé l'oculaire. Le phénomène, dont Mallard a donné la théorie (1), résulte de la très inégale absorption des rayons suivant la direction des vibrations. Il est surtout manifeste avec l'Épidote, la Cordiérite et l'Andalousite. Les lames de clivage d'Épidote suivant la base *p* se prêtent particulièrement bien à cette expérience.

§ 4

SPECTRES D'ABSORPTION. PHOSPHORESCENCE. FLUORESCENCE

Spectres d'absorption. — A côté du polychroïsme proprement dit, les cristaux peuvent manifester, sous l'influence de la lumière qui les traverse, d'autres particularités intéressantes, dont les lois ont été établies par Henri Becquerel (2). Si l'on projette sur certains cristaux la lumière d'une lampe oxhydrique, connue pour donner un spectre remarquablement continu, et

(1) *Bull. Soc. minér.*, II (1879), p. 72. — (2) *Annales de chimie et de physique*, XIV (1888).

qu'à la sortie cette lumière soit analysée au spectroscope, on y observe un certain nombre de bandes d'absorption.

Or on sait que, dans le spectre solaire, les raies noires sont dues à ce que les vapeurs qui entourent la photosphère absorbent précisément les radiations qu'elles émettraient elles-mêmes si elles étaient portées à l'incandescence. Il paraît donc nécessaire d'admettre que, dans les cristaux en question, l'action de la lumière doit faire passer certaines substances incluses à un état de vibration propre à mettre en jeu le pouvoir d'absorption spécifique.

Ce que peuvent être ces substances, on le soupçonnera sans peine, si l'on constate que le phénomène est surtout marqué avec les cristaux où l'analyse révèle la présence des éléments de ce qu'on appelle les *terres rares*, et surtout le didyme, par exemple avec le xénotime, la tysonite, la parisite, la monazite, etc. Les bandes ou raies, observées au travers d'un même cristal, ont dans le spectre des positions fixes, qu'il devient ainsi facile d'identifier avec les raies caractéristiques des divers corps simples. De la sorte, les spectres d'absorption deviennent un moyen d'analyse et peuvent déceler, dans un cristal, la présence d'éléments qui n'avaient pas encore été soupçonnés. De même l'allure des bandes peut conduire à suspecter, dans un élément jusque-là réputé unique, un mélange que les méthodes chimiques de fractionnement parviendront à mettre en évidence. Et c'est ainsi que, dans ces dernières années, on a été amené à multiplier beaucoup le nombre des corps simples du groupe des terres rares.

Mais, laissant de côté cette application, cherchons à préciser davantage les détails du phénomène.

Nous avons dit que les bandes observées au travers d'un même cristal avaient dans le spectre des positions fixes. Leur intensité seule varie. Henri Becquerel a constaté que, pour une bande ou raie, il existe dans un cristal trois directions rectangulaires, suivant l'une desquelles l'absorption est minimum ou nulle, tandis qu'elle est maximum suivant une autre. Dans les cristaux rhombiques, les trois directions sont celles des axes de symétrie. Les choses se passent comme si l'absorption était due à l'existence de mouvements vibratoires, synchrones des radiations éteintes, et qui, prenant naissance dans le cristal, sous l'influence de ces radiations, auraient pour siège, soit les molécules des corps, soit les intervalles intermoléculaires (1). Ces mouvements seraient orientés suivant les trois directions rectangulaires en question, et l'absorption ne se produirait que pour les composantes des mouvements lumineux parallèles aux directions des mouvements intermoléculaires, celles pour lesquelles les réactions élastiques du milieu sont parallèles aux déplacements.

M. Carvallo (2) a vérifié la loi de Becquerel pour la tourmaline, en constatant que cette loi s'étend aussi aux radiations calorifiques. Quand un rayon traverse un cristal absorbant, son état de polarisation change à mesure qu'il pénètre dans le cristal.

(1) H. Becquerel, *Comptes rendus*, CII, p. 106. — (2) *Comptes rendus* CXIV, p. 661.

Phosphorescence. — Dès le début, il a été aisé de reconnaître qu'il devait y avoir une relation entre les spectres d'absorption et la phosphorescence, les deux propriétés se trouvant développées à la fois dans les mêmes cristaux.

La phosphorescence est la faculté que possèdent certains corps, une fois frappés par la lumière, de rester lumineux, d'une nuance qui varie avec les corps, pendant un temps plus ou moins long. Si l'on prend un corps phosphorescent, longtemps gardé dans l'obscurité, et qu'on y projette un spectre solaire, on constate que ce spectre s'étend, bien au delà des limites ordinaires, du côté du violet. La partie ultra-violette devient ainsi visible par la phosphorescence qu'elle excite, et dont l'influence se fait sentir depuis la raie O de l'ultra-violet jusqu'à la raie F du vert.

Ce sont donc les rayons chimiques qui engendrent la phosphorescence. Mais sans pouvoir l'exciter, les rayons jaunes et rouges, même les rayons calorifiques, sont capables de l'activer là où elle existe. Le fait saillant, c'est qu'une matière phosphorescente absorbe une partie des rayons qu'elle reçoit, pour les émettre ensuite *sous forme de radiations moins réfrangibles*.

En outre, Crookes a montré (1) qu'un grand nombre de substances, en particulier celles qui renferment des terres rares, émettent de vives lueurs sous l'influence des rayons cathodiques, et la même propriété se manifeste, selon M. Urbain (2), sur l'*europium* extrait des terres de la monazite, du xénotime, de la pechblende, et dilué à divers degrés dans les oxydes. Le même auteur a été amené à conclure de ses expériences (3) que la phosphorescence se produit principalement dans des mélanges où certains corps, à l'état de traces, agissent comme excitateurs, tandis que la plus grande partie de la matière opère comme diluant. Ce serait ainsi une propriété atomique du genre de celles que mettent en évidence les solutions étendues. De plus, les éléments excitateurs offrent d'ordinaire des spectres d'absorption, tandis que les diluants en sont généralement dépourvus.

Fluorescence. — On appelle fluorescence la propriété que possèdent certains minéraux, en particulier la belle fluorine violette de Cornouailles, d'activer l'éclat des rayons lumineux qui les traversent, en les colorant d'une manière déterminée. Si, dans une chambre obscure, on fait tomber normalement un rayon de soleil sur une face de cette fluorine, en mettant l'œil dans le plan de la face illuminée, on constate que celle-ci émet une lueur bleue très vive. Mais, d'une part, le phénomène ne se passe que dans les couches superficielles du cristal et, d'autre part, si l'on remplit une cuve étroite avec une substance fluorescente, la lumière qui la traverse, et qui semble à peine affaiblie, est incapable d'exciter à nouveau la fluorescence dans un autre morceau de fluorine.

C'est que, dans cette traversée, la lumière a perdu ses radiations chimiques,

(1) *Comptes rendus*, XCII, p. 1281. — (2) *Comptes rendus*, CXLII, p. 205. — (3) *Comptes rendus*, CXLI, p. 955.

qui sont la principale cause du phénomène, comme on peut le constater en vérifiant qu'il est surtout produit par les rayons ultra-violets.

Il y a donc une étroite parenté entre la fluorescence et la phosphorescence. Dans les deux cas il se produit une transformation de radiations en d'autres de vibration plus lente. Mais la différence consiste en ce que la durée de la fluorescence est si minime qu'on ne peut même pas l'apprécier au phosphoroscope, bien que cet instrument permette d'évaluer le dix-millième de seconde.

La fluorescence peut être excitée par exposition aux émanations du radium (1).

On a cru longtemps que la fluorescence de la fluorine était due à un hydrocarbure. Mais on peut vérifier que ce minéral, qui fournit un spectre de phosphorescence cathodique ultra-violet, est susceptible de devenir au moins en partie phosphorescent par les terres rares qu'il contient constamment à l'état d'impuretés (2).

Les diverses variétés de fluorine deviennent phosphorescentes lorsqu'on les chauffe. A une température plus élevée, cette propriété disparaît. Mais on la voit revenir sous l'influence de la lumière ou de la décharge d'une bouteille de Leyde. La variété appelée *chlorophane* émet, quand on la chauffe, une belle lumière verte, particulièrement remarquable dans le vide cathodique. Or, M. Urbain y a reconnu (3) la présence des éléments suivants : samarium, gadolinium, terbium, dysprosium.

Interprétation des phénomènes. — Les propriétés qui viennent d'être sommairement décrites paraissent devoir être interprétées comme l'effet de vibrations spéciales, dues aux éléments des terres rares sous l'influence d'excitations lumineuses. En étudiant les déplacements que les raies d'absorption du xénotime et de la tysonite subissent sous l'influence d'un champ magnétique intense, M. Jean Becquerel (4) en a conclu qu'il s'agissait de mouvements d'*électrons*, les uns positifs, les autres négatifs. De plus, avec les deux mêmes minéraux il a constaté que, sous l'action de la chaleur, les bandes d'absorption s'étalent et diminuent d'intensité, sans que leur milieu cesse d'occuper la même place dans le spectre. Au contraire, par l'effet d'un jet d'air liquide, les bandes se transforment en raies fines, comparables à celles des vapeurs métalliques, pendant que le corps devient beaucoup plus transparent (5).

Ainsi la période du mouvement propre des électrons n'est pas influencée par la chaleur ; mais l'amortissement, c'est-à-dire la résistance que rencontrent les corpuscules en vibration, résistance qui paraît devoir être attribuée à l'influence des molécules, augmente ou diminue en même temps que la température. Un froid extrême, en immobilisant presque les molécules, laisserait aux électrons toute leur liberté.

Essai d'explication théorique. — On est ainsi bien tenté d'admettre, avec

(1) H. Becquerel, *Comptes rendus*, CXLIV, p. 671. — (2) Thomas, *Comptes rendus*, CXLIV, p. 30. — (3) *Comptes rendus*, CXLIII, p. 825. — (4) *Comptes rendus*, CXLIV, p. 132. — (5) *Comptes rendus*, CXLIV, p. 420 ; CXLV, p. 413.

M. de Kowalski (1), l'explication suivante pour l'ensemble des phénomènes d'absorption, de phosphorescence et de fluorescence : J. Thomson considère qu'un groupement de corpuscules, faisant partie d'un atome, produit de la lumière au moment où son énergie interne arrive à dépasser un certain *état critique*, que ce soit par une élévation de température ou par l'absorption de nouveaux électrons.

Dès lors on pourrait admettre que chaque corps phosphorescent comporte deux systèmes corpusculaires, l'un *électronogène* et l'autre *luminophore*. Le premier, sous l'influence d'une énergie extérieure, expulserait des électrons et ceux-ci, pénétrant dans le second groupe, élèveraient son énergie au-dessus de l'état critique. L'absorption ne serait pas durable dans les corps fluorescents, et la lumière ne s'y produirait qu'au moment de la traversée des luminophores par les électrons. Avec les substances phosphorescentes, les luminophores continueraient à rester lumineux jusqu'à ce qu'ils aient expulsé assez de corpuscules pour retomber au-dessous de l'état critique. Le spectre d'extinction s'expliquerait par le fait que certaines régions du spectre excitent plus que d'autres les rayons secondaires.

Nous ajouterons qu'il est important de noter la liaison expérimentale constante de ces divers phénomènes avec la présence d'éléments du groupe des terres rares. En effet, ces éléments sont tous pourvus d'un poids moléculaire exceptionnellement élevé (2), et il y a lieu de leur appliquer une ingénieuse remarque faite par M. J. Perrin à l'occasion des corps radio-actifs. Si les atomes des corps pondérables sont formés de corpuscules tournant autour d'un centre avec la vitesse des vibrations lumineuses, les éléments à poids moléculaire élevé doivent se distinguer par un plus grand nombre de *satellites atomiques*, dont beaucoup devront être relativement très éloignés du centre. M. Perrin les appelle les *neptunes* de ces systèmes solaires en miniature. Ces neptunes, mal retenus dans leurs orbites, deviendraient alors plus accessibles aux influences capables d'en détacher des corpuscules, et d'engendrer ainsi des phénomènes lumineux.

Triboluminescence. — Pour terminer ce qui concerne cet ordre de faits, il convient de dire un mot de la *triboluminescence*, propriété que possèdent certains cristaux, de développer des lueurs par actions mécaniques. Le phénomène a été constaté sur l'anhydride arsénieux, sur le sulfate de potassium, le fluorure de sodium, l'azotate de strontium, l'azotate d'uranyle, etc., ainsi que sur divers composés organiques. On avait cru qu'il se manifestait au moment même de la formation des cristaux. Mais il a été établi par M. Gernez (3) que la production de lumière avait lieu exclusivement au moment où les cristaux

(1) *Comptes rendus*, CXLIV, p. 266.

(2) Le poids atomique du didyme (c'est-à-dire du néodyme et du praséodyme), dépasse 140 ; celui du tantale 1[illegible], du radium 226 et de l'uranium 238.

(3) *Comptes rendus*, CXL, pp. 1134, 1234, 1336.

venaient à se briser, soit naturellement, soit au contact d'un outil qui les comprime.

CHAPITRE V

DÉTERMINATION OPTIQUE DES MINÉRAUX DANS LES PLAQUES MINCES

§ 1

PRÉPARATION DES PLAQUES ET INSTRUMENTS D'OBSERVATION

Préparation des lames et des plaques minces. — Les études de minéralogie micrographique ont pris, dans ces derniers temps, un tel développement, leur importance géologique est devenue si grande, qu'il nous paraît nécessaire de consacrer un chapitre à la description sommaire des principaux procédés usités pour la détermination des minéraux au microscope (1). Nous commencerons par dire un mot de la préparation des plaques, ainsi que des instruments le plus souvent employés pour leur examen.

Lorsqu'il s'agit de cristaux de dimensions appréciables, il est facile, à l'aide d'un archet en métal et d'un tour d'horloger, d'y découper des lames suivant les orientations qu'on a choisies. Il ne reste plus qu'à amincir les lames par frottement sur une meule à l'émeri. Alors, en les portant sous le microscope polarisant à lumière parallèle, on reconnaît, à l'absence ou à la présence de teintes chromatiques limitées par des contours nets, si le minéral est homogène ou s'il est composé de parties diversement orientées, avec ou sans intercalation de matières étrangères.

Quand on a affaire à une roche dont les minéraux composants ne peuvent pas être facilement isolés, on en détache au marteau une esquille convenablement choisie et l'on y fait naître une face plane, par polissage sur une meule horizontale à l'émeri. Cette face est alors appliquée, à l'aide du baume de Canada, sur un petit bloc prismatique de verre, qui lui servira de soutien, et l'on procède, comme auparavant, au polissage de la face opposée. On arrive ainsi, avec quelque habitude, à préparer des plaques dont l'épaisseur, d'ailleurs bien uniforme, ne dépasse pas deux ou trois centièmes de millimètre. Ces

(1) Voir, pour plus de détails : Fouqué et Michel Lévy, *Minéralogie micrographique*; Michel Lévy et Lacroix, *les minéraux des roches*; Rosenbusch, *Mikroskopische Physiographie der petrographisch wichtigen Mineralien*, 2e édit., 1885; Cohen, *Sammlung von Mikrophotographien*; Zirkel, *Petrographie.*

plaques sont collées avec du baume de Canada entre deux lames de verre, les précautions étant prises pour qu'il ne reste pas de bulles d'air interposées.

La préparation des plaques minces est devenue d'un usage courant. Il y a souvent grand avantage, pour un lithologiste, à effectuer lui-même cette opération ; car s'il en peut suivre les progrès sous le microscope, il aura déjà des données très utiles relativement à la nature des minéraux de la roche qu'il veut étudier. En effet, d'après ce que nous avons vu sur la très inégale biréfringence des espèces, si l'on use une plaque contenant un assez grand nombre de minéraux, de manière à l'amener progressivement jusqu'aux environs de $0^{mm},01$ ou $0^{mm},02$, les espèces qui perdront les premières leurs couleurs de polarisation seront la chlorite, puis l'idocrase, l'apatite, l'orthose, le quartz, etc. La calcite gardera toujours des couleurs vives. L'épaisseur des plaques étant habituellement comprise entre $0^{mm},01$ et $0^{mm},04$, l'orthose est généralement blanc ou de couleur gris-pâle, le quartz est d'un gris tirant parfois sur le jaune et le pyroxène vivement coloré en nuances allant du jaune au rouge et même au vert. Pour $0^{mm},05$, l'augite donnerait déjà du vert de second ordre.

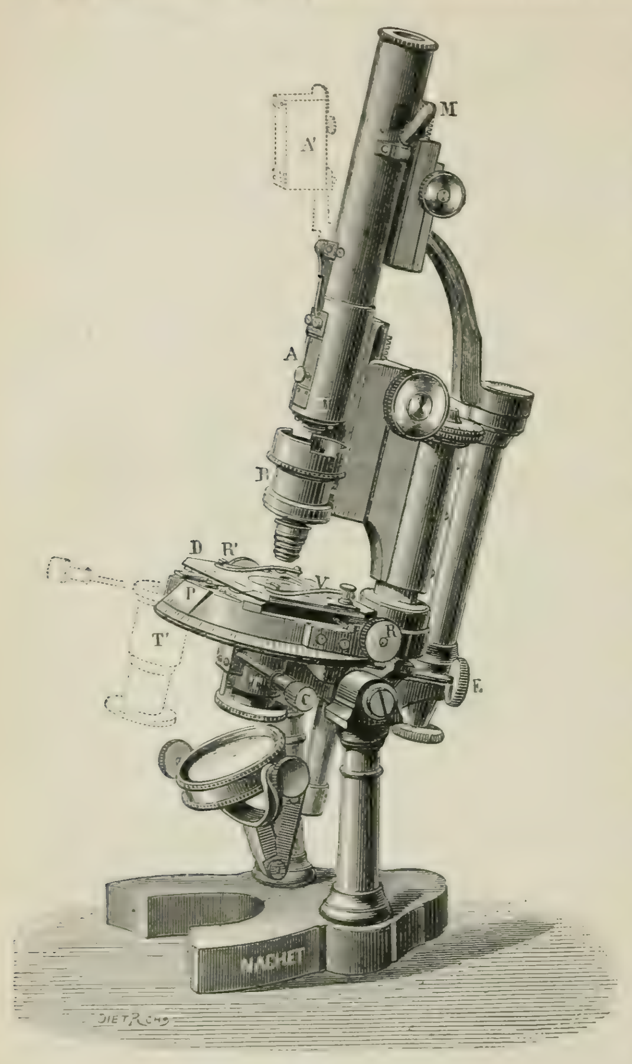


Fig. 310.

Emploi du microscope. — L'un des instruments les mieux adaptés aux études de plaques minces est le microscope Nachet, grand modèle (fig. 310). Le nicol

analyseur A est mobile et peut-être relevé en A', lorsqu'on veut observer le polychroïsme ou supprimer l'emploi de la lumière polarisée. De même, le polariseur T peut être abaissé avec le condenseur ou, par un mouvement de rotation, rejeté sur le côté en T'. La platine porte-objet, qui peut tourner avec un vernier, sur un limbe gradué, est munie de vis R, R', qui permettent de déplacer la préparation suivant deux directions perpendiculaires, de manière à amener au centre le point qu'on veut plus particulièrement observer. Mais la principale supériorité de l'appareil réside dans la disposition qui, en rendant l'oculaire indépendant de l'objectif, oblige ce dernier B à tourner en même temps que la plaque porte-objet, de telle sorte que, pendant cette rotation, le même point reste constamment au centre du champ de vision.

Le grand microscope est destiné aux observations en lumière parallèle. Mais on peut aussi s'en servir pour l'examen en lumière convergente. Pour cela, ou bien on emploie le système de M. Em. Bertrand, qui consiste à interposer, entre l'objectif et l'analyseur, un jeu de lentilles qui produit la convergence, en même temps qu'on installe un éclaireur au-dessus du polariseur ; ou bien on a recours au dispositif imaginé par Von Lasaulx. Après avoir placé, au-dessus du polariseur, un condenseur à double lentille, on installe un objectif à fort grossissement et on supprime momentanément l'oculaire. On voit alors apparaître, au moins dans certaines sections, une image d'interférence, d'autant plus nette qu'elle est plus petite, ce qui permet le plus souvent de reconnaître si le minéral est uniaxe ou biaxe.

On admettait avec Helmholtz que la limite de visibilité au microscope était le quart de micron (c'est-à-dire le quatre-millième de millimètre) et, pour des raisons tirées de la nature ondulatoire de la lumière, on regardait comme douteux que le dixième de micron pût jamais être dépassé. Depuis lors, cette limite semble avoir été poussée jusqu'au vingtième de micron (1). Mais la diffraction devrait empêcher d'aller au delà.

§ 2

EXAMEN DES PLAQUES MINCES

Détermination des sections similaires. — La première chose à faire consiste à distinguer, parmi les sections polygonales, à contours plus ou moins réguliers, que découpe une plaque mince, celles qui paraissent sûrement devoir être rapportées au même minéral. La nature, c'est-à-dire le nombre, la forme et la netteté des traces de clivage, le genre des inclusions, le relief, le poli, la coloration, sont autant de propriétés qui aident à établir ce groupement; c'est comme un premier triage, pendant lequel il convient d'abaisser le

(1) Mackendrick, *British Assoc.*, in *Revue scientifique*, 16 nov. 1901.

condenseur du microscope ou même de le supprimer (1). Le relief, en particulier, varie beaucoup avec la réfringence. Certains minéraux, en lumière naturelle parallèle, paraissent entièrement polis et n'arrêtent aucune portion des rayons. D'autres semblent rugueux, dépolis et présentent un grand nombre de points obscurs, à cause des réflexions totales qui se produisent sur leurs aspérités. Ces réflexions sont d'autant plus nombreuses que l'indice moyen de réfraction du minéral l'emporte plus sur celui du baume de Canada. Ainsi les sections du sphène et du rutile peuvent être presque complètement obscures en lumière naturelle.

Constatation de l'homogénéité. — Les sections similaires une fois isolées, il s'agit de recueillir des données sur la nature du minéral.

Un minéral est sûrement homogène lorsque, examiné entre les nicols croisés, et soumis à une rotation de 90° dans le plan de la plaque, il s'éteint une seule fois et présente une seule fois un maximum d'éclairement. Si ce cas ne se réalise pas, ou bien le minéral est composé de parties différemment orientées, dont les limites communes sont généralement rectilignes, c'est-à-dire que le cristal est *polysynthétique*, comme la plupart des feldspaths tricliniques; ou bien il s'agit d'un agrégat, soit homogène, soit hétérogène; c'est ainsi que les grains de quartz juxtaposés de certains quartzites, orientés chacun d'une manière particulière, offrent, sous les nicols croisés, l'aspect d'une mosaïque brillamment colorée, qui caractérise ce qu'on nomme la *polarisation d'agrégat*. Mais le microscope ne suffit pas, en général, pour décider si les éléments d'un agrégat sont de même nature ou de nature différente.

Minéraux isotropes. — Un minéral est *isotrope* lorsque, complètement éteint aux nicols croisés pour toute position de la plaque et offrant, aux nicols parallèles, avec la lumière blanche, le maximum de la teinte qui lui est propre, il ne change pas de *couleur* quand on fait tourner l'un des nicols, l'*intensité* seule de sa teinte variant avec l'angle des sections principales, sans qu'il se manifeste de couleurs d'interférence. Remarquons seulement que cette propriété peut appartenir : 1° aux corps amorphes, tels que les verres; 2° aux cristaux du système cubique; 3° aux crixtaux uniaxes taillés normalement à l'axe optique.

L'absence de contours polygonaux et de lignes de clivage fait reconnaître en général les corps *amorphes*, tandis que leur présence indique une symétrie *cubique*. Il faut également s'assurer que les sections constamment éteintes ne donnent, en lumière convergente, aucune image d'interférence.

Minéraux biréfringents. — Lorsque les sections présentent, pour la plupart, des teintes chromatiques et s'éteignent quatre fois pendant la rotation, le minéral est *anisotrope* (2). Il sera *uniaxe* si celles des sections qui demeurent

(1) Michel Lévy, *les Minéraux des roches*, p. 3.

(2) Ce paragraphe est textuellement reproduit de Rosenbusch, *Mikroskopische Physiographie der Mineralien*, 2e édit., p. 243.

constamment obsures laissent voir, en lumière convergente, une croix noire, accompagnée ou non de cercles isochromatiques, et dont les bras, pendant la rotation, ne changent pas ou se déplacent parallèlement à eux-mêmes.

Ce cas étant supposé réalisé, la substance est *quadratique* quand les sections qui donnent la figure d'interférence sont carrées ou octogonales ou quand elles montrent des lignes de clivage croisées à angle droit. Elle est *hexagonale* ou *rhomboédrique*, si les sections offrent la symétrie sénaire ou ternaire et si les fentes de clivage se croisent sous des angles de 60 degrés.

Supposons maintenant que, les sections offrant une teinte chromatique et s'éteignant quatre fois, aucune d'entre elles ne reste constamment éteinte (1); mais quelques-unes gardent le même éclairement et, de plus, laissent voir, en lumière convergente, la sortie d'un axe optique. Le minéral est alors *biaxe*.

Il sera *rhombique* si les sections comprises dans les trois zones principales ont des contours symétriques et si les directions d'extinction sont parallèles aux lignes de symétrie ou disposées symétriquement par rapport à ces lignes.

Le minéral sera *monoclinique* s'il n'y a de symétrie, dans les contours et les directions d'extinction, que pour la zone ph^1.

Il sera *triclinique* si, dans toutes les zones, il y a dyssymétrie des contours et des directions d'extinction.

Examen du caractère optique. — Un assez grand nombre des cristaux qu'on rencontre dans les plaques minces de roches ne se prêtent pas facilement à la mesure des angles d'extinction, soit parce que les lignes cristallographiques, auxquelles les angles devraient être rapportés, ne sont pas suffisamment définies sur le contour des minéraux, de telle sorte qu'on ignore dans quelle zone se trouve le plan de la lame; soit parce que les minéraux sont à l'état de *microlithes*, c'est-à-dire de cristaux microscopiques, dont la forme n'est pas susceptible d'une définition rigoureuse. En pareil cas, il faut chercher, à l'aide des dispositifs von Lasaulx ou Em. Bertrand, un indice, plus certain que ceux précédemment énoncés, pour savoir si la substance est uniaxe ou biaxe. Quelquefois, parmi les sections dont on dispose, il s'en trouvera qui laisseront voir (fig. 311), pour les cristaux uniaxes, des croix plus ou moins centrées, avec

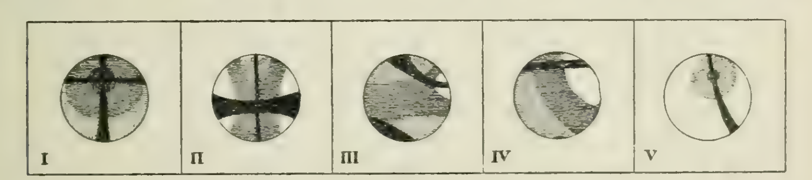


Fig. 311.

(1) A cause de la dispersion des axes, une plaque biaxe ne peut être normale à un axe optique que pour une seule radiation. Dès lors, si on l'éclaire par de la lumière blanche, il n'y a extinction que pour les radiations très voisines de celle en question. Il en résulte une certaine teinte.

apparences d'anneaux circulaires (I) et, avec les cristaux biaxes, une portion de la croix dyssymétrique (II) ou des deux hyperboles (III). D'autres fois, on aura simplement des portions de branches noires ou d'hyperboles, où les cristaux uniaxes (IV) se distingueront des cristaux biaxes (V), soit par l'allure nettement rectiligne des branches, soit par la disposition plus exactement circulaire des anneaux (1).

Détermination du signe optique. — Le plan d'une lame mince découpe, dans l'ellipsoïde des indices propre à la substance et à la radiation considérées, une section elliptique, dont les deux axes représentent les indices principaux du plan de la lame. Déterminer *le signe optique de la lame*, c'est reconnaître laquelle de ces deux directions correspond au plus grand indice n'_g et laquelle au plus petit indice n'_p. De là on peut parvenir à la connaissance du *signe optique de la substance*, si l'on sait quel rapport il y a entre les directions reconnues (qui sont celles d'extinction) et les axes cristallographiques ou optiques. Il suffit pour cela de se rappeler qu'une substance uniaxe est positive, quand la direction de l'axe est celle du plus grand indice n_g et qu'une substance biaxe est positive, quand la direction de n_g est la bissectrice aiguë de l'angle des axes optiques. Mais, sans aller jusque-là, il est souvent utile de déterminer le signe optique d'une lame mince découpant, dans la substance, une section manifestement allongée. On dira que *l'allongement est positif*, si celle des directions d'extinction qui fait, avec cet allongement, le plus petit angle, coïncide avec la direction de n'_g.

Nous avons déjà dit comment on pouvait déterminer le signe optique en lumière convergente. Il nous reste à montrer de quelle manière cette détermination peut s'effectuer, sur des lames minces, en lumière parallèle.

Le premier procédé consiste à employer une lame de quartz parallèle à l'axe, taillée en biseau et dont la teinte chromatique propre peut aller depuis le gris bleu du premier ordre jusqu'au gris violacé compris entre le troisième ordre et le quatrième, ce qui correspond à un retard variable entre un quart d'onde et trois ondes du jaune. Après avoir placé la lame cristalline étudiée à 45° de ses extinctions, on introduit le quartz, de telle sorte que la direction de l'axe coïncide avec celle du maximum d'éclairement. Si la compensation des teintes s'effectue, c'est-à-dire si, en avançant le coin de quartz d'une quantité suffisante, on arrive à amener la teinte de la lame au gris ou au noir, c'est que le quartz a ses axes croisés avec ceux de la section; sinon, on le tourne de 90 degrés et on recommence l'essai. Ce procédé est surtout efficace quand il s'agit de minéraux notablement biréfringents. Pour n'avoir pas à tourner le quartz de 90 degrés, on le découpe en rectangle, de manière que la direction de l'axe soit à 45° de l'allongement. Alors il suffit de retourner

(1) Voir, dans Fouqué et Michel Lévy, *Minéralogie micrographique*, ainsi que dans Michel Lévy, *les Minéraux des roches* (p. 89), un tableau des diverses figures qu'on peut avoir à observer.

cette lame rectangulaire pour que l'axe prenne la position à angle droit sur la première.

Avec les minéraux dont la biréfringence est très faible (quartz, cordiérite, microlithes de feldspath, etc.), il vaut mieux se servir d'une *lame sensible* de quartz parallèle, donnant le violet sensible compris entre le deuxième ordre et le troisième. En l'introduisant de telle façon que la direction de l'axe soit à 45 degrés des sections croisées des nicols, on voit que les microlithes dont la zone d'allongement est positive se teintent de bleu dans les quadrants correspondant à l'axe et de jaune dans les quadrants opposés.

Enfin les minéraux qui atteignent le blanc du premier ordre peuvent être étudiés avec une lame de mica quart-d'onde. Dans ce cas, au lieu de partir, comme précédemment, de la teinte sensible et de chercher les légères modifications que lui font subir des minéraux convenablement orientés, on part de la teinte du minéral et on la modifie légèrement, en lui superposant le mica quart d'onde (1), qui la fait, suivant les cas, *monter* ou *descendre*.

Étude de la biréfringence. — Nous savons que, si une lame mince homogène est éclairée par des rayons normaux d'une lumière monochromatique, l'*intensité* de la teinte qu'elle manifestera, entre les nicols croisés, dépendra : 1° de l'épaisseur de la plaque ; 2° de la valeur relative des deux axes de la section qu'elle découpe dans l'ellipsoïde des indices, c'est-à-dire de la différence entre les deux indices extrêmes, n'_g et n'_p, propres au plan de la plaque. Cette différence, $n'_g - n'_p$, porte le nom de *biréfringence de la lame*. Elle varie avec la position de cette dernière relativement aux éléments fondamentaux du cristal et elle atteint son maximum, $n_g - n_p$, quand la lame est parallèle aux deux axes du maximum et du minimum d'élasticité.

Si, au lieu de lumière monochromatique, on emploie de la lumière blanche, c'est la *teinte* de la lame qui sera influencée par la différence en question.

Cela posé, il existe (2) des formules qui permettent, pour une plaque mince, d'épaisseur connue, de fixer les limites entre lesquelles peut varier la teinte produite par la polarisation chromatique et, notamment, de prévoir la teinte qui correspond au *maximum de biréfringence*. M. Michel Lévy a imaginé un appareil, fondé sur l'emploi d'un comparateur de quartz, à l'aide duquel l'appréciation des teintes et la détermination de la biréfringence peuvent se faire avec une grande précision. Enfin le même auteur a construit un tableau graphique où sont indiquées, pour des épaisseurs de plaques variables entre 0 millimètre et 0mm,6, toutes les teintes que peut revêtir une lame mince de l'un quelconque des minéraux qui jouent un rôle tant soit peu important dans la constitution des roches.

Lors donc qu'on est en présence d'une plaque mince qui renferme plusieurs

(1) Pour plus amples développements, voir Michel Lévy et Lacroix, *les Minéraux des roches*, p. 41 et suiv.

(2) Voir Michel Lévy, *les Minéraux des roches*, p. 49.

sections d'un même minéral, il faut choisir celle qui développe la teinte chromatique la plus avancée. En général, pour les plaques de $0^{mm},01$ à $0^{mm},03$, que l'on produit couramment aujourd'hui, il est rare que le vert clair du second ordre soit dépassé : par conséquent, s'il s'agit d'un minéral assez réfringent, on choisira la section la plus voisine du vert et l'appareil comparateur donnera une valeur très approchée du maximum de biréfringence.

D'ailleurs, si l'on hésite pour savoir à quel ordre appartient la teinte observée, on peut lever la difficulté avec un quartz parallèle taillé en biseau. On superpose ce quartz à la lame cristalline, en ayant soin de croiser les axes d'élasticité des deux substances, et on enfonce progressivement le quartz, de manière que son épaisseur aille en croissant. La teinte de la lame baisse de plus en plus et finit par atteindre le gris ou le noir. Pendant ce mouvement, on voit défiler sous ses yeux toute la gamme des teintes de l'échelle chromatique, comprises entre celle de la lame et celle qui correspondrait à un retard nul. Si, dans ce défilé, une couleur analogue à la teinte primitive de la lame reparaît deux fois, c'est que la teinte était du troisième ordre ; elle eût été du deuxième si la couleur n'avait reparu qu'une fois, etc.

Quand une substance est très biréfringente, la moindre variation dans l'épaisseur de la lame mince suffit pour changer sa teinte chromatique. Voilà pourquoi les minéraux fortement biréfringents, tels que la calcite, développent entre les nicols croisés, dans une même plage, des teintes irisées parfois très vives.

Dans l'application de la méthode qui vient d'être décrite, on suppose que l'épaisseur de la lame mince est connue. On pourrait déterminer directement cette épaisseur en mettant au point, successivement (à l'aide de la vis de rappel du microscope, transformée en sphéromètre), les poussières du baume de Canada qui sont au-dessus et celles qui sont au-dessous de la lame. Mais M. Michel-Lévy recommande un procédé plus sûr, qui consiste à polir, en même temps que la plaque, de petits fragments de quartz parallèles à l'axe, lesquels, par la teinte qu'ils développent, font connaître avec précision l'épaisseur atteinte.

Ce n'est pas seulement la biréfringence, c'est-à-dire la différence $n_g - n_p$, qui peut être l'objet d'une mesure sur des cristaux microscopiques. Il est possible, à l'aide des *réfractomètres*, fondés sur le phénomène de la réflexion totale, d'obtenir une détermination assez approchée de la valeur des indices principaux de la substance, même en lames minces. Nous mentionnerons, comme propre à cet usage, malgré la délicatesse que présente son maniement, le réfractomètre à lentille demi-boule de M. Em. Bertrand.

DEUXIÈME SECTION

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DIVERSES GROUPEMENTS CRISTALLINS CRISTALLOGÉNIE

CHAPITRE I

PROPRIÉTES MÉCANIQUES DES CRISTAUX

§ 1

ÉLASTICITÉ, COHÉSION

Distribution de l'élasticité. — L'élasticité des cristaux est variable, non seulement avec les substances, mais encore, pour une substance donnée, avec les directions étudiées. M. Baumhauer a constaté que, dans la calcite, le maximum d'élasticité a lieu pour des baguettes taillées parallèlement aux arêtes culminantes du rhomboèdre p, tandis que le mininum se produit parallèlement aux axes binaires.

D'après MM. Voigt et Groth, l'élasticité du sel gemme, suivant les axes quaternaires, étant égale à 1, sa valeur suivant les axes ternaires est 0,763.

A l'exemple de Savart, divers observateurs ont cherché à apprécier l'élasticité des cristaux d'après la hauteur du son que donnaient, en vibrant, des plaques taillées suivant des directions définies, ou encore d'après les figures que faisaient naître les vibrations, dans la poussière préalablement répandue à la surface des lames. C'est ainsi que les plaques de quartz, suivant qu'elles étaient parallèles à p ou à b^1, ont offert des différences de ton capables de s'élever jusqu'à une quinte.

Dans tous les cas, la répartition de l'élasticité se montre toujours absolument conforme à la symétrie géométrique.

Cohésion. Clivage. — La cohésion varie, comme l'élasticité, suivant les directions. D'après les expériences de M. Sohncke (1), si, pour rompre une

(1) *Poggendorff's Annalen*, vol. CXXXVII, p. 177.

baguette de sel marin parallèle à un axe quaternaire du cube, il faut un effort de 1 kilogramme, il en faudra 2 pour une baguette parallèle à un axe ternaire et 2,6 pour une autre taillée suivant un axe binaire. La rupture a d'ailleurs lieu suivant les faces du cube, qui sont les faces de clivage de la substance.

Le clivage est le phénomène caractéristique de la cohésion dans les cristaux. Nous ne reviendrons pas sur les définitions que nous avons déjà données de cette propriété (1), qui met en évidence l'uniformité de la cohésion suivant les faces planes et l'existence de plans pour lesquels la cohésion est un maximum, tandis qu'elle atteint son minimum normalement à ces plans.

Les plans de clivage sont toujours des faces cristallines et, comme tels, subordonnés à la symétrie propre à chaque espèce. Ainsi toute direction de clivage non perpendiculaire à un axe ternaire doit se répéter trois fois, dans des conditions identiques, autour de cet axe. La calcite possède trois clivages également faciles, parallèles aux faces p du rhomboèdre primitif. La galène a également trois clivages égaux, parallèles aux faces p du cube, tandis que la fluorine en a quatre, parallèles à l'octaèdre a^1, et la blende six, parallèlement au dodécaèdre b^1. En général, l'identité de deux clivages permet d'affirmer qu'ils appartiennent à une même forme, tandis que des clivages inégaux ne peuvent appartenir qu'à des formes distinctes.

Directions de clivage dans le système cubique. — Les directions de clivage, étant celles du minimum de cohésion, peuvent généralement être prévues *a priori* en raison de la symétrie du système cristallin.

Ainsi, dans le système cubique, la combinaison la plus simple est celle qui fait des trois axes quaternaires trois directions, d'ailleurs identiques entre elles, de minimum ou de maximum pour la cohésion. Dans le premier cas, le clivage a lieu parallèlement à p, c'est-à-dire aux faces du cube.

Dans le second cas, si, en se maintenant dans un même plan principal de symétrie, on passe de l'un à l'autre des axes quaternaires qui s'y trouvent contenus, on doit vraisemblablement rencontrer un seul minimum suivant l'axe binaire qui est bissecteur de l'angle droit des deux axes quaternaires. Cet axe est, comme on sait, normal à l'une des faces du rhombododécaèdre b^1. Mais, d'autre part, en considérant le trièdre trirectangle formé par les trois axes quaternaires, auxquels correspondent trois maxima d'égale valeur, on comprend la nécessité d'un minimum intermédiaire, pour lequel la position la plus simple est celle qui le fait coïncider avec un axe ternaire. Ainsi le cas examiné comporte deux directions de minimum, d'ailleurs inégales entre elles. Suivant que la valeur du premier minimum est inférieure ou non à la seconde, le clivage doit avoir lieu suivant le rhombododécaèdre b^1 ou suivant l'octaèdre a^1.

En pratique, le clivage p est le plus fréquent ; ensuite vient b^1 ; a^1 est beau-

(1) Voir plus haut, p. 16.

coup plus rare. Ainsi l'expérience montre que tous les cristaux cubiques présentent, pour la cohésion, le plus petit nombre de maxima et de minima que comporte leur degré de symétrie.

Clivages des cristaux uniaxes et biaxes. — Si l'on admet que la même règle s'applique aux cristaux uniaxes, on trouvera que les clivages doivent se produire : pour le système hexagonal, suivant la base *p*, les faces *m* et quelquefois celles d'une protopyramide; pour le système quadratique, suivant *p*, *m*, plus rarement $b^{\frac{1}{2}}$; de plus, le clivage basique doit être le plus fréquent, car il correspond au minimum de cohésion suivant l'axe et, dans le cas où cet axe est la direction du maximum, le minimum peut se produire aussi bien suivant les normales aux prismes que suivant les normales aux pyramides, ce qui laisse de l'indétermination. L'expérience confirme d'ailleurs tous ces résultats.

Dans le système rhomboédrique, les clivages ont lieu suivant le rhomboèdre *p*, fréquemment suivant la base a^1, rarement suivant le prisme e^2.

Enfin, pour les autres systèmes, les clivages les plus fréquents sont : dans le système rhombique, l'un des trois pinacoïdes *p*, h^1, g^1, parfois même tous les trois à la fois; souvent les faces *m*, rarement $b^{\frac{1}{2}}$; dans le système monoclinique, le plan de symétrie g^1, h^1, *p*, *m*, a^1 ou $b^{\frac{1}{2}}$; enfin, dans le système triclinique, *p*, g^1, *m*.

Phénomènes de glissement. Figures de percussion et de décollement. — Dans beaucoup de minéraux cristallisés, le choc ou la pression déterminent un déplacement des particules, par suite duquel le cristal se partage en éléments d'orientation différente, maclés suivant des surfaces planes (voir plus loin les lois qui président aux macles). D'autres fois, les mêmes actions font naître, dans le cristal, des faces planes dites faces de *glissement* et dont la direction diffère de celle des plans de clivage.

D'après les expériences de M. Reusch, si, après avoir taillé, sur deux arêtes *d* opposées d'un rhomboèdre de clivage de calcite, des facettes parallèles au prisme d^1, on comprime le cristal entre ces deux plans, on voit se produire et miroiter, dans l'intérieur, des surfaces parallèles au rhomboèdre inverse b^1. Ces surfaces ont donc la même direction que certains plans de macle fréquents dans l'espèce. M. Reusch explique ce fait en admettant que la pression provoque une rotation des molécules autour d'un axe situé dans b^1 et en même temps perpendiculaire à l'arête *b* qui correspond au plan de glissement. De la sorte, les molécules acquièrent une nouvelle situation d'équilibre. Le même auteur a constaté un fait très remarquable et qui donne du poids à son hypothèse, c'est que, pourvu qu'une face de glissement ne traverse pas toute l'épaisseur du cristal de calcite, on peut la faire disparaître en chauffant ce dernier.

Une expérience non moins curieuse, également relative à la calcite, est celle de M. Baumhauer; mais nous en réserverons la description pour le chapitre des groupements cristallins.

Des fragments de clivage de sel gemme, soumis à la compression, se fendent quelquefois parallèlement aux faces du rhombododécaèdre. Enfin, en attaquant avec un burin d'acier, soit par choc, soit par pression, divers cristaux, on obtient des *figures de percussion* ou *de décollement* dont l'allure, intéressante à étudier, est toujours conforme à la symétrie du cristal.

Dans ces divers phénomènes, qui mettent tous en jeu la cohésion des particules, on voit que les surfaces de facile séparation peuvent varier suivant le mode qu'on emploie pour produire l'effort mécanique et suivant le sens dans lequel agit cet effort. Ce qui offre un intérêt particulier, c'est la tentative que les particules semblent faire, dans certains cas, pour échapper non seulement par un glissement, mais aussi par un changement d'orientation, à l'effort qu'elles subissent.

§ 2

DURETÉ

Appréciation de la dureté. Échelle de Mohs. — La dureté est la résistance qu'un corps oppose à l'action d'un outil tranchant qui tend à entamer sa surface. La dureté des cristaux peut être appréciée, tantôt avec une pointe d'acier trempé, tantôt avec une arête d'un cristal de dureté connue. On fait naître ainsi, à la surface des cristaux, des stries ou *rayures*, qui se produisent avec plus ou moins de facilité suivant les espèces. En tout cas, il faut toujours avoir soin d'opérer sur une face plane bien nette, de peur de prendre pour des rayures les traces qu'un outil peut laisser en désagrégeant des éléments cristallins mal unis entre eux, comme les parties d'un cristal fendillé, par exemple. De plus, il faut s'assurer que la rayure persiste après nettoyage de la face, car souvent des apparences de rayures sont dues à ce que l'outil est lui-même attaqué par le cristal, sur lequel il laisse une trace, comme celle qu'un marteau abandonne après le choc sur un bloc de grès dur.

La dureté des minéraux est un élément important de leur détermination spécifique. Il y a longtemps que Mohs a constitué une *échelle de dureté*, comprenant dix termes successifs, dont chacun raye celui qui le précède et est rayé par celui qui le suit. En voici l'énumération :

1. Talc.
2. Gypse ou sel marin.
3. Calcite.
4. Fluorine.
5. Apatite.
6. Orthose.
7. Quartz.
8. Topaze ou Émeraude.
9. Corindon.
10. Diamant.

Les deux premiers termes représentent des minéraux qui se rayent à l'ongle. Les numéros 3 et 5 sont rayés par une pointe d'acier. La dureté du numéro 6

est à peu de chose près celle du verre à vitres. A partir de 7 les minéraux rayent nettement le verre. Lorsqu'un minéral est rayé par l'apatite, tandis qu'il raye la fluorine, on dit que sa dureté est égale à 4,5.

Bien entendu, l'échelle de Mohs n'est pas rigoureusement proportionnelle ; il n'y a pas la même distance entre les différents termes et, en particulier, la différence de dureté est beaucoup plus grande entre 9 et 10 qu'entre 4 et 5. Néanmoins cette échelle suffit aux besoins des minéralogistes, et tout essai de l'enrichir n'aurait pour résultat que d'en rendre l'emploi moins facile.

Scléromètre. — Lorsqu'on veut se rendre compte de l'effort mécanique nécessaire pour produire la rayure, on emploie le *scléromètre* de Franz. C'est un chariot, pouvant être mis en mouvement à l'aide de poids et portant la lame à étudier, sur laquelle presse une pointe d'acier, fixée à l'extrémité d'un levier. Ayant mis le chariot en mouvement, on charge la pointe avec des poids jusqu'à ce que la rayure apparaisse. MM. Calvert et Johnson ont reconnu, par cette méthode, que la dureté de la fonte de fer étant exprimée par 1 000, celle du fer en barres est 948 et correspond au numéro 5 de l'échelle de Mohs, tandis que la dureté de l'argent, égale à 208, se place entre 3 et 2,5. Le numéro 2,5 correspond au bismuth, dont la dureté est 52. L'étain, avec 27, correspond au numéro 2, et le plomb, avec 15, répond à 1,5.

D'autres auteurs indiquent 10 pour le gypse, équivalent du plomb, 12 pour l'aluminium ; la calcite équivaudrait en gros à l'ensemble de l'argent (91), du cuivre (95) et de l'or (97). Le laiton (107) correspondrait à la fluorine. Entre le bronze (127) et le cuivre dur (143) se placerait l'apatite, et le quartz, avec une dureté moyenne de 361, serait l'équivalent de l'acier.

Depuis longtemps les minéralogistes avaient reconnu que les chiffres de dureté ne présentaient pas un caractère absolu et que certains minéraux, tels que le disthène, offraient une dureté égale à 5 sur les faces du clivage, tandis qu'elle s'élevait à 7 sur les autres faces naturelles. Les expériences exécutées, à l'aide du scléromètre, par MM. Franz, Grailich, Pekarek et Exner, ont établi la généralité de ce phénomène, en même temps qu'elles ont permis d'en préciser les lois.

Variations de la dureté. — On a reconnu d'abord que la dureté ne varie, suivant les faces, que dans les cristaux susceptibles de se cliver et que toujours le minimum de dureté se produit sur les faces de clivage.

Au premier abord, rien ne paraît plus paradoxal que ce résultat ; car il semblerait que les expériences de dureté dussent mettre en jeu la cohésion des particules, et puisque nous savons que c'est dans les plans de clivage que la densité réticulaire et, avec elle, la cohésion, atteignent leur plus grande valeur, on devrait logiquement s'attendre à ce que le plus grand effort fût nécessaire pour rayer les faces de clivage. Or, non seulement c'est l'inverse qui se produit, mais en outre, si l'on prend une face de clivage p d'un rhomboèdre de calcite et qu'on essaie de la rayer en partant du sommet ternaire a, on constate qu'il

même qu'il y a des corps transparents et des corps opaques, il y a aussi des cristaux *diathermanes* et des cristaux *athermanes*.

Le sel gemme est le corps dont les cristaux sont le plus diathermanes. Cette propriété est moins développée dans la calcite et moins encore dans le gypse; elle fait complètement défaut dans les métaux. Il n'y a d'ailleurs aucune relation entre le pouvoir diathermane et la transparence pour la lumière; car une plaque de mica foncé est diathermane, tandis qu'une couche d'eau de même épaisseur est athermane.

En général, les diverses radiations calorifiques sont différemment absorbées dans un même cristal. Si cette inégalité d'absorption est peu marquée, on dit que le corps est *incolore pour la chaleur* (1). Cette propriété appartient à un petit nombre de substances, toutes cristallisées dans le système cubique, telles que les chlorures de potassium, de sodium, d'argent, ainsi que le sulfure de zinc. Il y a des corps, tels que l'alun de potasse, qui, parfaitement incolores pour la lumière, absorbent néanmoins une partie des rayons calorifiques.

La transmission de la chaleur par rayonnement donne lieu, dans les cristaux, à des phénomènes de réflexion et de réfraction, qui obéissent aux mêmes lois que les phénomènes lumineux du même ordre. A ce point de vue, on doit encore distinguer des cristaux isotropes, où toutes les radiations calorifiques se propagent avec une vitesse indépendante de la direction ; des cristaux uniaxes, où les rayons sont doublement réfractés, sauf dans la direction de l'axe principal; enfin des cristaux biaxes, où l'existence de la double réfraction calorifique se prouve de la manière suivante : une lame de mica est soumise, entre les nicols croisés, à l'influence de rayons calorifiques. De même que par une rotation de 360 degrés dans son plan, cette plaque deviendrait, sous la seule action de la lumière, quatre fois éclairée et quatre fois obscure, de même il y a quatre positions pour lesquelles la plaque ne se laisse pas traverser par les rayons de chaleur, tandis que, dans les situations intermédiaires, elle transmet la plupart des radiations (2).

Conductibilité calorifique. Courbes thermiques. — Les variations de la conductibilité calorifique dans les cristaux peuvent être constatées par une méthode dont le principe est dû à Sénarmont. On étale, sur la face à étudier, une couche mince de cire, et, quand cette couche est consolidée, on échauffe un point déterminé de la surface à l'aide d'une pointe métallique. La cire fond tout autour du point échauffé, avec une vitesse d'autant plus grande que la chaleur se propage plus vite et, au bout d'un temps donné, tous les points simultanément atteints par la fusion se trouvent distribués sur une certaine courbe, dite *courbe thermique*. Si la chaleur se propageait également vite dans toutes les directions, cette courbe devrait être un cercle. Il en est ainsi pour tous les cristaux isotropes, ainsi que pour les plaques normales à un axe

(1) Groth, *Physikalische Kyrstallographie*, p. 130.
(2) Groth, *loc. cit.*

principal. Dans tous les autres cas, la courbe thermique est une ellipse. Des dispositions ingénieuses ont été imaginées par M. Jannettaz (1), tant pour mesurer commodément le rapport des axes de l'ellipse thermique que pour soustraire la surface de la lame au rayonnement de la source de chaleur, destinée à produire l'échauffement local.

On peut aussi fixer, en quelque sorte, les courbes thermiques par la méthode de M. Röntgen (2). Si l'on souffle, par un temps frais, sur une face cristalline, l'humidité de l'haleine s'y condense. En appliquant immédiatement, sur la lame, une pointe métallique chaude, on vaporise l'humidité autour de la pointe. Si, quand cette vaporisation a fait quelques progrès, on arrose vivement la plaque avec de la poudre de lycopode, cette poussière ne reste adhérente que là où la vaporisation ne s'est pas encore fait sentir. On peut donc, en époussetant le cristal avec soin, obtenir une ellipse assez nettement délimitée pour que la mesure de ses axes soit facile.

Variations des courbes thermiques. — Les corps isotropes présentent la même conductibilité dans toutes les directions. Aussi les courbes thermiques y sont-elles toujours circulaires.

Dans les cristaux uniaxes, la direction de l'axe est celle du maximum ou du minimum de conductibilité. La courbe thermique n'est donc circulaire que pour les plaques normales à l'axe cristallographique principal. Pour toute autre direction, c'est une ellipse, dont l'un des axes est toujours compris dans la section principale de la plaque.

Enfin, dans les cristaux à deux axes, le maximum et le minimum de conductibilité se font sentir suivant deux directions rectangulaires, toujours liées aux éléments de symétrie du système. Si les trois axes d'élasticité optique sont les mêmes pour toutes les couleurs, les axes de conductibilité sont aussi les mêmes pour toutes les radiations calorifiques.

On comprend que l'étude de la conductibilité puisse rendre de grands services, lorsque l'opacité d'une substance, d'ailleurs dépourvue de formes extérieures déterminables, empêche d'en faire l'examen optique. En pareil cas, la forme de la courbe thermique permet de reconnaître le système cristallin, et en mesurant, pour diverses plaques, la direction et la valeur relative des axes de conductibilité, on peut arriver à fixer les principaux éléments cristallographiques de la substance.

Influence des directions d'hémimorphisme, de clivage et de compression. — D'après MM. Thompson et Lodge, l'axe de la tourmaline, dont les deux extrémités ne sont pas terminées par les mêmes pointements, ne conduit pas la chaleur avec une égale vitesse dans les deux sens. Ainsi la conductibilité ne dépend pas seulement de la distribution des particules maté-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, XXIX. — *Bull. Soc. géol. de France*, 3e série, III, p. 499.
(2) *Annales de Poggendorf*, vol. CLI, p. 603.

même qu'il y a des corps transparents et des corps opaques, il y a aussi des cristaux *diathermanes* et des cristaux *athermanes*.

Le sel gemme est le corps dont les cristaux sont le plus diathermanes. Cette propriété est moins développée dans la calcite et moins encore dans le gypse; elle fait complètement défaut dans les métaux. Il n'y a d'ailleurs aucune relation entre le pouvoir diathermane et la transparence pour la lumière; car une plaque de mica foncé est diathermane, tandis qu'une couche d'eau de même épaisseur est athermane.

En général, les diverses radiations calorifiques sont différemment absorbées dans un même cristal. Si cette inégalité d'absorption est peu marquée, on dit que le corps est *incolore pour la chaleur* (1). Cette propriété appartient à un petit nombre de substances, toutes cristallisées dans le système cubique, telles que les chlorures de potassium, de sodium, d'argent, ainsi que le sulfure de zinc. Il y a des corps, tels que l'alun de potasse, qui, parfaitement incolores pour la lumière, absorbent néanmoins une partie des rayons calorifiques.

La transmission de la chaleur par rayonnement donne lieu, dans les cristaux, à des phénomènes de réflexion et de réfraction, qui obéissent aux mêmes lois que les phénomènes lumineux du même ordre. A ce point de vue, on doit encore distinguer des cristaux isotropes, où toutes les radiations calorifiques se propagent avec une vitesse indépendante de la direction ; des cristaux uniaxes, où les rayons sont doublement réfractés, sauf dans la direction de l'axe principal; enfin des cristaux biaxes, où l'existence de la double réfraction calorifique se prouve de la manière suivante : une lame de mica est soumise, entre les nicols croisés, à l'influence de rayons calorifiques. De même que par une rotation de 360 degrés dans son plan, cette plaque deviendrait, sous la seule action de la lumière, quatre fois éclairée et quatre fois obscure, de même il y a quatre positions pour lesquelles la plaque ne se laisse pas traverser par les rayons de chaleur, tandis que, dans les situations intermédiaires, elle transmet la plupart des radiations (2).

Conductibilité calorifique. Courbes thermiques. — Les variations de la conductibilité calorifique dans les cristaux peuvent être constatées par une méthode dont le principe est dû à Sénarmont. On étale, sur la face à étudier, une couche mince de cire, et, quand cette couche est consolidée, on échauffe un point déterminé de la surface à l'aide d'une pointe métallique. La cire fond tout autour du point échauffé, avec une vitesse d'autant plus grande que la chaleur se propage plus vite et, au bout d'un temps donné, tous les points simultanément atteints par la fusion se trouvent distribués sur une certaine courbe, dite *courbe thermique*. Si la chaleur se propageait également vite dans toutes les directions, cette courbe devrait être un cercle. Il en est ainsi pour tous les cristaux isotropes, ainsi que pour les plaques normales à un axe

(1) Groth, *Physikalische Kyrstallographie*, p. 130.
(2) Groth, *loc. cit.*

principal. Dans tous les autres cas, la courbe thermique est une ellipse. Des dispositions ingénieuses ont été imaginées par M. Jannettaz (1), tant pour mesurer commodément le rapport des axes de l'ellipse thermique que pour soustraire la surface de la lame au rayonnement de la source de chaleur, destinée à produire l'échauffement local.

On peut aussi fixer, en quelque sorte, les courbes thermiques par la méthode de M. Röntgen (2). Si l'on souffle, par un temps frais, sur une face cristalline, l'humidité de l'haleine s'y condense. En appliquant immédiatement, sur la lame, une pointe métallique chaude, on vaporise l'humidité autour de la pointe. Si, quand cette vaporisation a fait quelques progrès, on arrose vivement la plaque avec de la poudre de lycopode, cette poussière ne reste adhérente que là où la vaporisation ne s'est pas encore fait sentir. On peut donc, en époussetant le cristal avec soin, obtenir une ellipse assez nettement délimitée pour que la mesure de ses axes soit facile.

Variations des courbes thermiques. — Les corps isotropes présentent la même conductibilité dans toutes les directions. Aussi les courbes thermiques y sont-elles toujours circulaires.

Dans les cristaux uniaxes, la direction de l'axe est celle du maximum ou du minimum de conductibilité. La courbe thermique n'est donc circulaire que pour les plaques normales à l'axe cristallographique principal. Pour toute autre direction, c'est une ellipse, dont l'un des axes est toujours compris dans la section principale de la plaque.

Enfin, dans les cristaux à deux axes, le maximum et le minimum de conductibilité se font sentir suivant deux directions rectangulaires, toujours liées aux éléments de symétrie du système. Si les trois axes d'élasticité optique sont les mêmes pour toutes les couleurs, les axes de conductibilité sont aussi les mêmes pour toutes les radiations calorifiques.

On comprend que l'étude de la conductibilité puisse rendre de grands services, lorsque l'opacité d'une substance, d'ailleurs dépourvue de formes extérieures déterminables, empêche d'en faire l'examen optique. En pareil cas, la forme de la courbe thermique permet de reconnaître le système cristallin, et en mesurant, pour diverses plaques, la direction et la valeur relative des axes de conductibilité, on peut arriver à fixer les principaux éléments cristallographiques de la substance.

Influence des directions d'hémimorphisme, de clivage et de compression. — D'après MM. Thompson et Lodge, l'axe de la tourmaline, dont les deux extrémités ne sont pas terminées par les mêmes pointements, ne conduit pas la chaleur avec une égale vitesse dans les deux sens. Ainsi la conductibilité ne dépend pas seulement de la distribution des particules maté-

(1) *Annales de Chimie et de Physique*, 4e série, XXIX. — *Bull. Soc. geol. de France*, 3e série, III, p. 499.
(2) *Annales de Poggendorf*, vol. CLI, p. 603.

rielles sur une ligne donnée : elle dépend aussi de la forme de ces particules, qui, lorsqu'elles sont dyssymétriques, sont, pour ainsi dire, différemment *attaquées* par la chaleur dans les deux sens.

Les expériences de M. Jannettaz ont établi que la conductibilité thermique atteint son maximum suivant les plans de clivage. Cette loi, qui comporte quelques exceptions, revient à identifier les grands axes thermiques avec les rangées de plus petit paramètre. Mais elle ne saurait être absolue, la conductibilité, sur une direction donnée, étant une résultante, qui dépend non seulement de la distribution de la matière sur cette direction, mais de sa répartition sur les directions voisines (1).

Ce qui prouve bien, du reste, que la conductibilité est influencée moins par l'écartement des particules que par la nature de leurs actions réciproques, c'est que, d'après une expérience de Sénarmont, reproduite par M. Jannettaz, le verre, comprimé dans une direction, voit sa courbe isotherme *s'aplatir* suivant cette direction même. Il semble donc qu'alors la pression ait développé des forces répulsives qui diminuent la conductibilité (2).

Dilatabilité. Coefficient de dilatation dans les cristaux isotropes. — En général, les corps se dilatent lorsque la température s'élève. Cette loi ne comporte que peu d'exceptions; par exemple le diamant, à — 42°,3, le cuivre oxydulé à — 4°,3, l'émeraude à — 4°,2, offrent, d'après M. Fizeau, un maximum de densité, au delà duquel un refroidissement ultérieur les dilate. L'iodure d'argent se contracte, quand on le chauffe, dès la température ordinaire. Mais, en dehors de ces cas particuliers, tout corps solide chauffé subit un accroissement de volume. Si l est la longueur, à zéro, d'une tige isotrope, telle que du verre, et l' sa longueur à 100 degrés, l'expérience montre que le rapport $\frac{l'-l}{l}$ est constant. C'est ce qu'on nomme le *coefficient de dilatation linéaire* et on le désigne habituellement par α.

Cela posé, dans les cristaux isotropes, le coefficient de dilatation a la même valeur quelle que soit la direction. Par suite, les trois axes quaternaires s'allongeant, à toutes les températures, de la même quantité, leurs paramètres demeurent égaux entre eux. Toute face, définie par (qrs), c'est-à-dire par les inverses des longueurs $\frac{1}{q}$, $\frac{1}{r}$, $\frac{1}{s}$, qu'elle intercepte sur les trois axes quaternaires, sera, à 100 degrés, définie par les longueurs

$$\frac{1}{q}(1+\alpha) \qquad \frac{1}{r}(1+\alpha) \qquad \frac{1}{s}(1+\alpha).$$

Ces trois quantités restant toujours dans la même proportion relativement

(1) Mallard, *Traité de Cristallographie*, II, p. 95.
(2) Mallard, *loc. cit.*

aux trois premières, les longueurs relatives qui servent à définir la face ne varient pas, c'est-à-dire que les angles que fait cette face avec les faces du cube sont invariables, quelle que soit la température. Ainsi, non seulement les cristaux cubiques demeurent cubiques à toutes les températures, mais les angles mutuels de leurs faces n'éprouvent aucune altération.

Cristaux anisotropes. Variabilité des angles dièdres. — Il n'en est pas de même pour les autres systèmes cristallins. En général, chaque direction possède son coefficient de dilatation spécial. Si une face intercepte, sur les trois axes conjugués Ox, Oy, Oz, des longueurs égales à $\frac{1}{q}a$, $\frac{1}{r}b$, $\frac{1}{s}c$, quand la température est égale à zéro, ces longueurs deviendront, à 100 degrés,

$$\frac{1}{q}a(1+\alpha) \qquad \frac{1}{r}b(1+\beta) \qquad \frac{1}{s}c(1+\gamma),$$

α, β, γ étant les coefficients linéaires relatifs à Ox, Oy, Oz, et a, b, c les paramètres de ces axes. Donc, il n'y aura plus, à 100 degrés, entre les longueurs interceptées, les mêmes rapports qu'à zéro. La direction de la face aura dû changer relativement aux éléments de la forme fondamentale. Ainsi, pour tous les cristaux non isotropes, *les angles mutuels des faces varient avec la température*. De la sorte, la loi de l'invariabilité des angles, découverte par Romé de l'Isle, n'est absolue que pour une température déterminée.

Hâtons-nous de dire que, dans la pratique, cette variation des angles dièdres est peu sensible et que, dans les limites des expériences usuelles, elle ne dépasse pas un nombre peu considérable de minutes. Ainsi, d'après Mitscherlich, une élévation de température de 100 degrés ne réduit que de 8 minutes l'angle dièdre des faces p d'un rhomboèdre de calcite.

Permanence du parallélisme et du caractère général de la symétrie. — Mais si les angles mutuels des faces sont ainsi susceptibles de varier, les couples de faces parallèles demeurent parallèles à toutes les températures et, de plus, la symétrie du système cristallin reste la même, du moins dans la majorité des cas. Le premier résultat est facile à concevoir, car les longueurs interceptées sur les axes conjugués, par deux faces parallèles QRS, Q'R'S', étant proportionnelles entre elles, continueront à l'être après la dilatation. OQ sera devenu $OQ(1+\alpha)$ et OQ' sera $OQ'(1+\alpha)$. Le rapport $\frac{OQ}{OQ'}$ sera donc le même qu'auparavant. Quant à la symétrie du système, l'expérience prouve que les lignes cristallographiques équivalentes éprouvent un égal allongement. Ainsi, dans un cristal uniaxe, l'axe principal est une ligne de maximum ou de minimum de dilatabilité. Dans le premier cas, les directions normales à l'axe sont toutes des directions de minimum; dans le second cas, c'est l'inverse. Il suit de là qu'un cristal uniaxe demeure tel à toutes les températures.

Parmi les cristaux de cette catégorie, le spath d'Islande offre une particula-

rité curieuse. Tandis que, suivant l'axe, le coefficient de dilatation linéaire est positif et égal à 0,00293, le coefficient perpendiculaire est *négatif* et a pour valeur — 0,00049. Ainsi une baguette taillée normalement à l'axe ternaire éprouverait, tout en augmentant de volume, un léger raccourcissement par la chaleur. Il y a donc, entre la direction de l'axe et celle de la normale, une position intermédiaire, telle qu'une baguette taillée suivant cette direction ne subirait en s'échauffant aucun allongement.

Les cristaux biaxes ont trois directions principales de dilatabilité, rectangulaires entre elles. Si les axes d'élasticité optique sont les mêmes pour toutes les couleurs, on observe que les mêmes directions sont aussi celles des axes principaux de dilatabilité.

Influence de la chaleur sur les propriétés optiques. — La chaleur, en modifiant les distances mutelles des particules, ne peut manquer d'influer sur la distribution de l'éther interposé. C'est ce que l'expérience confirme, en montrant que, dans les solides, l'indice de réfraction, c'est-à-dire la vitesse de propagation de la lumière, change avec la température.

Cette variation respecte, en général, les conditions ordinaires de la symétrie. Ainsi un cristal isotrope demeure isotrope à toutes les températures. De même, un cristal uniaxe demeure uniaxe; mais les deux indices, ordinaire et extraordinaire, ne subissent pas toujours des variations proportionnelles. En pareil cas, il peut arriver qu'un cristal, très peu biréfringent à la température ordinaire, ne présente plus, une fois chauffé, aucune différence entre l'indice ordinaire et l'autre. Dès lors, à la température correspondante, il sera devenu isotrope, mais *seulement pour une radiation déterminée*.

Dans les cristaux biaxes, les trois indices principaux éprouvant, avec la température, des modifications inégales, il en doit résulter des variations dans l'angle des axes optiques, lié, comme nous savons, à la valeur des élasticités optiques principales. Les importantes recherches de Des Cloizeaux ont montré que ce changement était très diversement marqué suivant les substances; pour le plus grand nombre, la température de l'ébullition de l'eau ne produit qu'une altération de quelques degrés dans l'angle des axes. Le gypse est beaucoup plus sensible : bien au-dessous de cent degrés, l'angle de ses axes devient nul. Le cristal est uniaxe, mais seulement pour une radiation déterminée. Au delà de ce point, l'ancien indice minimum devient supérieur à l'indice moyen et le plan des axes optiques s'ouvre dans une direction rectangulaire avec celle où il était précédemment contenu.

La variation produite par la chaleur dans l'angle des axes est tantôt momentanée, tantôt permanente. Ainsi, les cristaux de feldspath orthose, chauffés au rouge sombre, éprouvent une altération définitive, ce qui ne les empêche pas de conserver, dans leur nouvel état, une certaine faculté de variation temporaire.

Fusibilité des cristaux. — Il importe de remarquer ici que la fusion d'un cristal réclame toujours une température plus élevée que celle qui convient à

la fusion du colloïde de même composition. Ainsi un verre ayant la composition du feldspath anorthite se liquéfie entre 1083° et 1110°, et sa cristallisation commence vers 1210°, tandis que la destruction du réseau cristallin de l'anorthite ne se fait qu'à 1490°.

En général, tout cristal, représentant un état plus stable, est à la fois plus réfractaire, plus dur, plus lourd et plus résistant aux agents chimiques que le colloïde correspondant.

§ 2

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME DANS LES CRISTAUX

Sources d'électricité. — L'électricité peut se développer dans les cristaux, comme dans toutes sortes de corps, par le frottement. En pareil cas, le quartz s'électrise positivement, comme le verre, tandis que le soufre et l'ambre prennent l'électricité négative. On peut aussi électriser des cristaux en les clivant ou en les brisant. C'est ainsi que le clivage du gypse et du mica fait naître, sur les faces des lamelles, des électricités de signes contraires. La pression électrise l'aragonite, la fluorine et le quartz, mais surtout la calcite, avec laquelle la pression des doigts suffit. Les cristaux de tourmaline, comprimés suivant l'axe, développent des électricités contraires aux deux extrémités (1).

Il y a certainement des lois qui régissent la distribution de l'électricité dans les cristaux, notamment en ce qui concerne le pouvoir conducteur, dont l'intensité doit varier avec les directions dans les cristaux anisotropes. Mais les lois de la conductibilité n'ont pas été l'objet d'expériences nombreuses et leur connaissance ne semble pas devoir offrir un grand intérêt pratique.

Pyroélectricité. — Il en est autrement de certains phénomènes électriques, dont la production se montre intimement liée au degré de symétrie des cristaux. De ce nombre est la *Pyroélectricité*, c'est-à-dire la propriété que possèdent certains cristaux de développer, aux deux extrémités, pendant qu'on les chauffe, des électricités contraires, dont la distribution devient exactement inverse pendant que les cristaux se refroidissent, et qui disparaissent quand la température est devenue constante. G. Rose a nommé pôles *analogues* ceux qui sont positifs par échauffement et pôles *antilogues* les autres.

Tous les cristaux qui offrent le phénomène de l'hémimorphisme, c'est-à-dire dans lesquels un même axe est terminé par des pointements dissemblables, sont pyroélectriques suivant cet axe. Tel est le cas de la tourmaline, de la calamine et de la topaze. Pour cette dernière substance, la pyroélectricité ne se manifeste que sur les cristaux vraiment hémimorphes. Sur ceux où, sans doute par suite de macles, les deux extrémités de l'axe ne diffèrent pas, ces extrémités devien-

(1) J. et P. Curie, *Comptes rendus*, XCI, pp. 294, 383.

nent l'une et l'autre positives; en brisant un de ces cristaux suivant la base, qui est une face de clivage, celle-ci s'électrise négativement, tandis que le pointement est positif.

Relation de la pyroélectricité avec les phénomènes mériédriques. — Du reste, la pyroélectrité, qui témoigne d'une polarité électrique et par conséquent d'une dyssymétrie des molécules suivant certaines directions, doit se produire suivant toutes les lignes cristallographiques où cette dyssymétrie est mise en évidence par la différence des facettes.

Ainsi les expériences de M. Ch. Friedel ont montré (1) que le quartz peut développer une pyroélectricité en rapport avec l'hémiédrie qui le caractérise. Les diagonales de base du prisme e^2, aboutissant chacune à deux arêtes verticales, dont l'une porte les faces de l'hémiisocéloèdre et des hémiscalénoèdres, tandis que l'autre en est dépourvue, sont des axes de pyroélectricité. En effet, les arêtes latérales du prisme e^2 sont alternativement positives et négatives par échauffement, négatives et positives par refroidissement. Les arêtes positives par échauffement sont celles qui portent les faces rhombes et plagièdres (2); elles deviennent négatives par refroidissement. La même propriété s'observe dans les cristaux de blende suivant les axes ternaires, ce qui se comprend aisément, la blende étant tétraédrique.

Pour rendre l'observation de ces phénomènes plus facile, au lieu d'employer des cristaux naturels, M. Friedel s'est servi de plaques dont les faces parallèles avaient été taillées perpendiculairement aux axes que l'hémiédrie tendait à faire reconnaitre pour des lignes de pyroélectricité. Dans ce cas, pour une variation de la température, l'une des faces de la plaque, examinée au plan d'épreuve, devenait positive et l'autre négative.

Au contraire, un cristal naturel de quartz, soumis à un refroidissement parfaitement régulier, ne donne pas de signes sensibles d'électricité. Cela tient à ce que le quartz possède trois axes de pyroélectricité, qui se neutralisent et qu'il est nécessaire d'isoler, en obligeant la dilatation à se produire seulement dans le sens de l'un d'eux (3).

MM. Curie ont établi qu'il existe un rapport intime entre l'électricité produite par compression, ou *piézoélectricité*, et la pyroélectricité. Quand la pression augmente, l'électricité qui se développe correspond à celle que fait reconnaître le refroidissement, tandis que la diminution de la pression produit le même effet que l'échauffement.

Thermoélectricité. — Quand deux morceaux de métaux différents, tels que l'antimoine et le bismuth, sont mis en contact et réunis, d'autre part, à l'aide d'un fil conducteur, si l'on chauffe le point de contact, il se développe un courant électrique. Cette propriété est connue sous le nom de *Thermoélectricité*. Le courant se dirigeant, à partir du contact, de l'antimoine vers le bismuth,

(1) *Bull. Soc. minéralog. de France*, II, p. 31; V, p. 282. — (2) Voir plus haut, pp. 176, 177. — (3) Friedel et Curie, *Comptes rendus*, XCVI, 30 avril et 14 mai 1883.

on dit que ce métal est, au point de vue thermoélectrique, positif à l'égard du bismuth. L'observation montre que l'antimoine est positif et le bismuth négatif pour tous les corps simples métalliques. Or la pyrite de fer FeS^2 se comporte de telle façon que certains cristaux sont positifs, même pour l'antimoine, et certains autres négatifs, même pour le bismuth. Il en résulte que deux cristaux de signes contraires, mis en contact et chauffés, développent un courant thermoélectrique plus intense que celui qui va de l'antimoine au bismuth. Très souvent, sur un même cristal, on trouve des parties positives et des parties négatives.

D'après les recherches de M. J. Curie (1), les deux variétés, positive et négative, de pyrite, peuvent être distinguées sur les cristaux qui offrent la forme du dodécaèdre pentagonal. Parmi les dodécaèdres, il en est dont les faces sont striées *parallèlement à celles des arêtes qui sont parallèles aux arêtes cubiques*, tandis que, chez les autres, les faces sont striées *perpendiculairement à ces mêmes arêtes*. A part quelques exceptions, les cristaux de la première catégorie sont plus positifs que l'antimoine, tandis que ceux de la seconde sont négatifs à peu près comme le bismuth. La cobaltine donne le même résultat, mais avec moins de régularité, les stries étant peu nettes et mal développées.

La présence simultanée de plusieurs substances métalliques dans les filons n'a pas dû être sans influence sur la formation de certains minéraux, par voie de précipitation galvanique, dans les dissolutions qui parcouraient ces fentes de l'écorce terrestre.

Magnétisme. — Le magnétisme est une propriété commune à tous les corps qui, sous ce rapport, se divisent en *paramagnétiques* ou attirables à l'aimant et *diamagnétiques* ou repoussés par l'aimant. Un corps de la première catégorie, suspendu entre les deux pôles d'un aimant, prend ce qu'on appelle la position *axiale*. Un corps diamagnétique, au contraire, se tourne à angle droit, prenant la position *équatoriale*.

Si une sphère d'une substance amorphe est exactement suspendue entre les deux pôles d'un aimant, elle reste en équilibre dans toute position, qu'elle soit para- ou diamagnétique, parce que tous ses diamètres sont équivalents. Les corps cristallisés dans le système cubique jouissent de la même propriété, et il faut les tailler en baguettes pour reconnaître le signe de leur magnétisme.

Les cristaux uniaxes offrent, suivant l'axe principal, soit le maximum, soit le minimum de magnétisme. Une sphère taillée dans un de ces cristaux ne reste en équilibre que si elle est suspendue de manière à ne pouvoir tourner qu'autour de l'axe principal.

Les cristaux biaxes ont trois directions principales de magnétisme, à angle droit les unes sur les autres, et qui coïncident avec les élasticités optiques principales, quand celles-ci sont les mêmes pour toutes les couleurs.

(1) *Bull. Soc. minéralog.*, VIII, p. 127.

Le magnétisme agit avec assez d'intensité sur les minéraux ferreux pour permettre d'en opérer l'extraction. Dans la poussière d'une roche, un électro-aimant, dont on fait progressivement varier la puissance, enlève d'abord le fer oxydulé, puis les minéraux riches en fer et finit par extraire jusqu'à l'amphibole et au pyroxène (1).

Ajoutons que le magnétisme peut développer chez certains minéraux la polarisation rotatoire.

CHAPITRE III

GROUPEMENTS CRISTALLINS

§ 1

LOIS EXPÉRIMENTALES DES GROUPEMENTS CRISTALLINS

Notion des groupements. — Jusqu'ici nous ne nous sommes occupés que des cristaux *simples*, c'est-à-dire de ceux dans toute l'étendue desquels le système réticulaire se poursuit sans changement, portant, en tous ses nœuds, des molécules identiques et de même orientation.

Mais cette simplicité est rarement réalisée dans la nature. Beaucoup de cristaux sont *complexes*; soit qu'ils résultent de la juxtaposition visible de plusieurs individus diversement orientés et se touchant par un contour commun; soit que, présentant l'apparence extérieure d'une forme simple, ils soient en réalité composés de parties, d'orientation non identique. Les associations du premier genre, qui portent le nom générique de *macles*, se révèlent au premier coup d'œil par les *angles rentrants* auxquels donne lieu la jonction des individus distincts. Quant à celles du second genre, elles parviennent à notre connaissance par les phénomènes optiques. Lorsqu'un cristal, d'apparence unique, a été taillé en plaque mince et soumis aux expériences de polarisation chromatique, nous savons que, pour une épaisseur donnée, sa section tout entière doit se colorer de la même teinte si le cristal est simple. Mais si cette section se divise en *plages*, caractérisées chacune par une teinte spéciale et limitées par des lignes nettes, cela prouve que chacune d'elles a son orientation cristallographique à elle et qu'ainsi la simplicité de la forme exté-

1 Fouqué, *Minéralogie micrographique*.

rieure masque une constitution interne d'une plus ou moins grande complication.

Par exemple, la Chabasie, qui affecte la forme de rhomboèdres, montre, quand on coupe l'un de ces rhomboèdres en plaque parallèle à a^1, une division en six secteurs, dont la figure 317 indique la disposition, en faisant connaître les directions d'extinction de chaque élément.

Ce sont les lois de ces groupements qu'il convient maintenant d'étudier. Les derniers constituent tout un ordre de phénomènes que M. Tschermak (1) a rangés sous la dénomination de *mimésie* (de μιμητής, imitateur), appelant cristaux *mimétiques* ceux où l'association de plusieurs individus réalise une symétrie trompeuse. L'observation montre que, loin de se faire d'une façon capricieuse et arbitraire, ces divers groupements obéissent à des règles bien déterminées. Ce résultat était d'ailleurs à prévoir; car si l'on comprend qu'au sein d'un liquide en voie de cristallisation, les circonstances soient assez variables, d'un point à un autre, pour ne pas permettre l'absolue identité d'orientation de toutes les particules cristallines, du moins on se rend aisément compte que deux portions immédiatement voisines doivent exercer l'une sur l'autre une certaine influence. Leurs assemblages réticulaires ne peuvent donc présenter une complète indépendance.

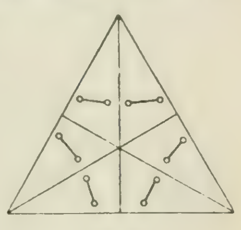


Fig. 317.

Pour connaître la nature de cette influence réciproque, adressons-nous d'abord à l'observation.

Cristaux accolés, Hémitropie. — Laissant de côté, pour un moment, l'étude des groupements internes, bornons notre attention à ceux qui se traduisent par l'*accolement* de deux cristaux, se présentant en quelque sorte comme des *jumeaux*, d'où le nom de *Zwillinge*, donné par les Allemands à ces associations.

Celle des conditions qui est le plus habituellement réalisée est la suivante : *Les deux individus s'accolent suivant une face plane, qui est un plan réticulaire commun à tous les deux.* De plus, cette face appartient généralement à une forme *de notation simple*, ce qui se comprend, puisque, servant de limite commune aux deux cristaux, elle a toutes chances d'être empruntée à l'une des formes les plus fréquentes de l'espèce.

Cela posé, l'observation montre, en général, que la situation mutuelle de deux individus, se touchant par une face plane, peut être géométriquement définie, si l'on imagine que l'un d'eux, primitivement situé dans le prolongement exact de l'autre, ait exécuté une rotation de 180 degrés autour d'un certain axe; non qu'on veuille affirmer que cette rotation ait eu lieu en réalité,

(1) *Lehrbuch der Mineralogie*, 1re édit., p. 89.

mais parce qu'elle suffit à rendre compte *géométriquement* de la relation observée. Une telle demi-rotation porte le nom d'*hémitropie* et l'on dit alors que les cristaux sont *maclés par hémitropie*. Le mouvement est d'ailleurs entièrement défini, si l'on fait connaître la position de la *face de jonction* et celle de l'*axe d'hémitropie*.

Exemples d'hémitropie. Système cubique. — Les exemples d'hémitropie abondent dans la nature.

Dans le système cubique, les plus fréquentes sont celles qui associent deux individus suivant une face octaédrique a^1, avec l'axe ternaire normal à cette face pour axe de rotation. De ce nombre est la macle de deux octaèdres, si fréquemment réalisée dans le groupe des spinelles. L'octaèdre (fig. 318) ayant été coupé par un plan MNP, parallèle à la face ABC, la rotation de la seconde moitié a lieu autour de la normale à MNP, et comme cette ligne est un axe ternaire, autour duquel une rotation de 120 degrés procure simplement la restitution des sommets, il suffit, pour donner lieu à la macle, de faire tourner la partie mobile de 60 degrés, ce qui amène A en A′, B en B′ et C en C′. De cette manière, les triangles, tels que AMN, isolés par la section, viennent faire face, par des angles rentrants, aux triangles immobiles tels que SNP, tandis que les éléments trapézoïdaux, comme MNA′B′, se juxtaposent suivant l'arête de rupture MN, en faisant naître des angles saillants.

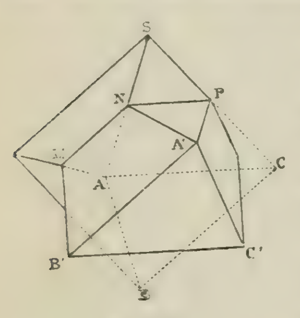
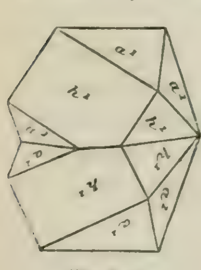


Fig. 318.

Systèmes quadratique et rhomboédrique. — Les hémitropies normales du système quadratique se font avec une face de jonction parallèle à une proto- ou deutéro-pyramide. La figure 319 représente deux individus de Cassitérite ou étain oxydé, maclés suivant une face parallèle à b^1. La rencontre des pyramides a^1, sur la gauche du dessin, donne lieu à un angle rentrant particulier, formé de quatres facettes triangulaires, qui porte le nom de *bec d'étain* et qu'on appelle quelquefois aussi macle *en visière*, à cause de son analogie avec la visière d'un casque.


Fig. 319.

Les macles rhomboédriques les plus habituelles, avec axe d'hémitropie normal à la face de jonction, se font autour de l'axe ternaire; dès lors, une rotation de 60 degrés est suffisante. Appliquée au scalénoèdre (fig. 320), cette hémitropie fait naître une sorte d'isocéloèdre, avec trois *becs* ou angles rentrants, c'est-à-dire un solide pourvu d'un plan de symétrie normal à l'axe ternaire, plan qui ferait défaut au scalénoèdre, sans la macle. La même hémitropie, agissant sur la combinaison du prisme e^2 avec un rhomboèdre (tel que b^1 pour la calcite), donne un solide symétrique (fig. 321) sur lequel les arêtes

en chevrons se correspondent verticalement en haut et en bas d'une même face e^1, au lieu d'alterner comme dans le polyèdre non maclé de la figure 195.

La calcite offre aussi (fig. 322) l'exemple de deux rhomboèdres p, maclés par hémitropie normale suivant une face parallèle à b^1.

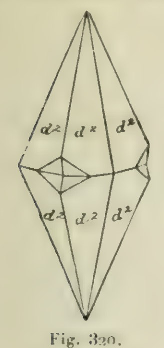


Fig. 320.

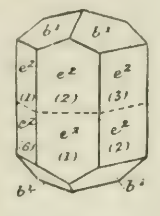


Fig. 321.

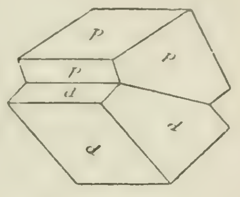


Fig. 322.

Systèmes rhombique et monoclinique. — Dans le système rhombique, une macle très connue est celle de l'aragonite, où le plan de jonction est l'une des faces du protoprisme. Concevons (fig. 323) la section droite d'un cristal allongé suivant g^1 et couronné par un brachydôme e^1. Soit AB le plan de jonc-

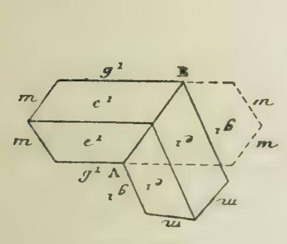


Fig. 323.

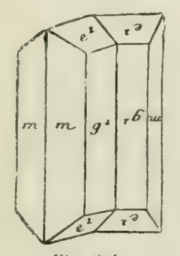


Fig. 324.

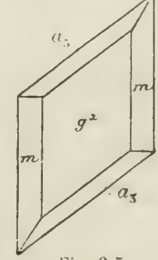


Fig. 325.

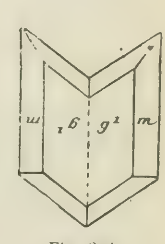


Fig. 326.

tion, parallèle à l'une des faces m. Après la rotation, les deux individus forment, suivant l'arête projetée en A, un angle rentrant (fig. 324). Assez souvent cette macle se répète plusieurs fois, soit en sens alternatifs, donnant lieu à une sorte d'escalier, soit dans le même sens, en faisant naître une espèce de polyèdre annulaire, où tous les angles rentrants sont tournés du même côté.

Comme exemple d'hémitropie dans le système monoclinique, nous citerons le gypse. Un cristal simple (fig. 325), offrant les faces m, g^1 et a_3, est coupé en deux parties par un plan parallèle à h^1. L'une des moitiés du cristal tourne de 180° autour de la normale à h^1 et vient se placer en regard de la précédente (fig. 326). Parfois même la macle se double (fig. 327), chacune des moitiés se prolongeant à travers l'autre.

Au lieu d'une hémitropie suivant h^1, il peut y avoir, comme dans la *macle de Manebach* (ou de *Four-la-Brouque*) de l'orthose (fig. 328), hémitropie normale avec p pour face de jonction. Comme dans le cas précédent, les faces a^1 des deux individus de la macle sont dans le prolongement l'une de l'autre.

Certains cristaux monocliniques, notamment l'orthose, sont maclés par accolement suivant g^1, avec hémitropie autour de la normale à g^1, c'est-à-dire de l'axe binaire. Aussi les deux réseaux coïncident-ils absolument après la rotation et l'on ne s'aperçoit de la macle qu'à une ligne de suture qui, sur les faces de la zone ph^1, sépare les deux individus composants.

Enfin l'orthose offre encore un cas qui s'éloigne sensiblement des précédents, celui de la *macle de Carlsbad* (fig. 329). Deux cristaux, formés des faces p, m, g^1 et $a^{\frac{1}{2}}$, se pénètrent mutuellement, ayant leurs faces g^1 parallèles, mais tournées en sens inverse, comme si l'un d'eux, primitivement orienté de la même manière que l'autre, avait tourné de 180 degrés autour d'une parallèle à l'arête *mm*. Ici donc il y a encore hémitropie, mais l'axe de cette

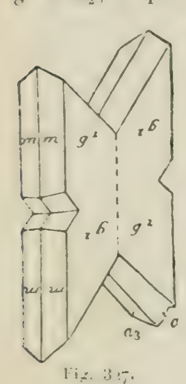


Fig. 327.

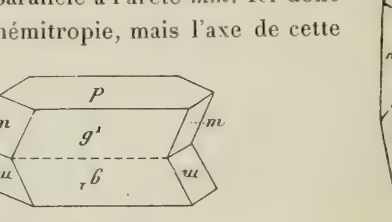


Fig. 328.

Fig. 329.

hémitropie est situé *dans le plan de jonction*, au lieu de lui être perpendiculaire, comme dans tous les exemples précédents.

Système triclinique. — Des hémitropies très caractéristiques s'observent dans les feldspaths tricliniques. La première est la *macle* dite *de l'Albite*.

Représentons (fig. 330) la coupe, par un plan normal à g^1, d'un cristal triclinique réduit aux faces p et g^1, lesquelles ne sont pas perpendiculaires l'une à

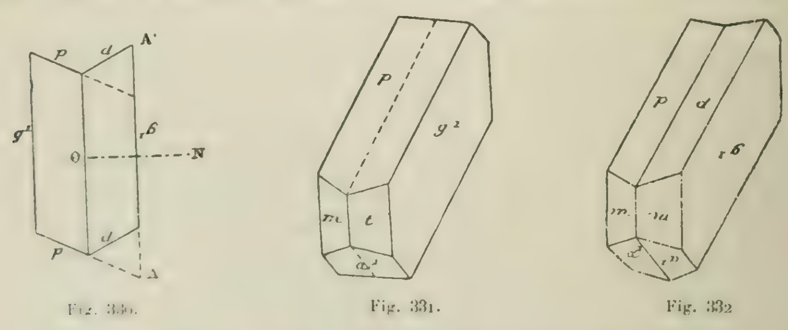


Fig. 330. Fig. 331. Fig. 332

l'autre. Coupons ce cristal, en son milieu, par un plan parallèle à g^1 et faisons tourner la moitié de droite de 180° autour de la ligne ON, normale à ce plan. Après la rotation, l'angle aigu A se sera transporté en A' et les faces p des deux moitiés formeront, d'un côté un angle rentrant, de l'autre un angle saillant.

Vu en perspective, un cristal d'albite (fig. 331), coupé en deux suivant la ligne ponctuée et soumis à cette hémitropie, offre après la rotation l'aspect de

la figure 332. Les deux faces p forment en haut un angle rentrant d'environ 173 degrés, produisant, en raison de l'allongement habituel des cristaux suivant l'arête pg^1, une *gouttière* caractéristique. D'un côté le cristal est terminé par deux faces m, tandis que, du côté opposé, il y a deux faces t en contact.

Très souvent, la macle par hémitropie des feldspaths tricliniques s'opère entre individus extrêmement minces et se répète un grand nombre de fois. La juxtaposition de ces lamelles hémitropes fait naître, sur les faces p, des stries ou cannelures, correspondant aux angles alternativement saillants et rentrants, et ces stries sont tout à fait caractéristiques des faces de clivage des feldspaths.

L'orientation cristallographique de deux lamelles contiguës étant différente, mais les lames ayant, de deux en deux, la même orientation, une plaque mince de feldspath hémitrope, examinée en lumière parallèle, se colore de deux teintes alternatives (fig. 333); les lamelles impaires s'éteignent toutes en même temps, pour une position donnée de la plaque relativement aux nicols croisés. Il en est de même des lamelles paires et les directíons d'extinction des deux séries, marquées sur la figure par des flèches, font des angles égaux avec la trace du plan de jonction. De tels cristaux sont dits *polysynthétiques*.

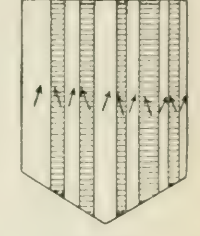


Fig. 333.

On connaît encore, dans les cristaux tricliniques, une macle semblable à celle de Carlsbad et une autre, dite *macle du péricline*, où les individus sont accolés suivant une face de la zone ph^1, plus ou moins voisine de p, l'un d'eux ayant tourné de 180° autour de l'arête ph^1, située dans le plan de jonction. Cette macle entraîne la formation sur le plan g^1, auquel l'arête ph^1 n'est pas exactement normale, d'angles alternativement saillants et rentrants. Quand elle se répète plusieurs fois, ce qui est un cas assez habituel, il en résulte une série de lames hémitropes, et si ces lames sont minces, elles dessinent une succession de stries sur le plan moyen g^1 du cristal composé, tout comme la macle de l'albite en fait naître sur le plan moyen des faces p.

Résumé. — Dans tous les cas que nous venons d'analyser, nous avons vu que les faces de jonction des cristaux maclés étaient de notation simple. Très souvent elles appartiennent à des formes normales, comme a^1 pour les systèmes cubique et rhomboédrique, g^1 pour le système monoclinique; ou à des formes parallèles, telles que a^2 pour le système cubique (cas du cuivre gris), b^1 pour les systèmes quadratique et rhomboédrique, m pour le système rhombique, p et h^1 pour le système monoclinique. Quelquefois, comme dans l'orthose (*macle de Baveno*), la face d'hémitropie est empruntée à une forme oblique, telle que $e^{\frac{1}{2}}$; mais ce cas est relativement rare et d'ailleurs cette face, quoique oblique, est encore de notation très simple.

Nous avons vu en outre que l'axe d'hémitropie était tantôt perpendiculaire, tantôt parallèle à la face de jonction. Une étude plus complète nous aurait

montré que l'une de ces deux conditions n'est pas toujours réalisée et qu'il y a des macles qu'on ne peut expliquer géométriquement que par des rotations différant de 180° et exécutées autour d'axes inclinés sur la face d'accolement.

Voilà tout ce que l'expérience peut nous apprendre relativement aux groupements de cristaux. Les minéralogistes de l'école allemande n'en ont pas cherché davantage et, préoccupés seulement de définir, dans chaque cas particulier, la position occupée par les *plans de juxtaposition* et les axes de rotation, ils ont laissé de côté la recherche des causes qui produisent ces groupements. Cette recherche a d'abord provoqué les études de Mallard (1), qui ont donné aux théories de Bravais un complément et une sanction de la plus haute valeur, puis celles de M. Wallerant, dont nous chercherons ici à exposer les grandes lignes.

§ 2

THÉORIE DES MACLES DE MALLARD
1° MACLES PAR JUXTAPOSITION

Conditions d'équilibre de deux cristaux juxtaposés. — Mallard avait cru devoir distinguer deux catégories de groupements, les groupements par *juxtaposition* ou *accolement* (vraies *macles*) et les groupements *par pénétration mutuelle* ou *par entrecroisement* (*Durchkreuzung-Zwillinge* des Allemands). Il expliquait les premiers de la façon suivante : La plupart des faits d'observation, en particulier l'existence même des groupements, par pénétration mutuelle, d'individus à orientations particulaires non identiques, montrent que l'équilibre interne d'un édifice cristallin doit dépendre surtout de la position des centres de gravité des particules et n'est que très peu influencé par l'orientation propre de celles-ci. Admettons ce principe et rappelons-nous que les macles par juxtaposition se font toujours suivant des plans réticulaires de notation simple, c'est-à-dire de *grande densité* (2) et par conséquent aussi écartés que possible des plans limitrophes.

On en peut conclure que l'équilibre entre les deux cristaux juxtaposés doit dépendre principalement, sinon uniquement, des actions exercées entre les centres de gravité (auxquels il nous est loisible de réduire les particules) de chacun des deux plans qui entourent le plan de macle.

Considérons donc deux plans réticulaires contigus, de grande densité, P et P' (fig. 334), occupant la position relative qu'ils ont dans le système cristallin unique, de telle sorte que les nœuds a', b', c', d', du plan P', correspondent aux nœuds a, b, c, d, du plan P. Les particules de P' sont en équilibre sous

(1) *Bull. Soc. minér.* (1885), VIII, p. 452. — (2) V. *antè*, pp. 38, 40.

l'action des forces émanant des particules de P, et aussi sous celle des forces que les molécules de P′ exercent les unes sur les autres.

En admettant que les plans P et P′ avaient une grande densité réticulaire, nous avons, par cela même, admis que, dans chacun d'eux, les centres de gravité particulaires se trouvaient très peu écartés les uns des autres. Dans ces conditions, il est permis d'admettre que les forces mutuelles agissant dans P′ suffisent à maintenir les particules du plan dans les positions relatives qu'elles occupent. Et alors les choses se passent comme si les plans P et P′, avec leur structure réticulaire invariable, étaient des plans matériels, dont l'écartement mutuel est maintenu par les forces qui s'exercent d'un plan à l'autre.

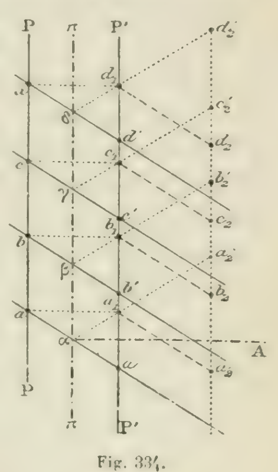


Fig. 334.

Remarquons d'ailleurs (toujours avec Mallard) que la mutuelle indépendance des plans réticulaires de grande densité paraît trouver dans l'expérience une justification suffisante, par suite de l'existence des clivages, notamment des clivages très faciles, comme celui du mica, espèce dont on peut isoler, sur de grandes surfaces, des strates réticulaires extrêmement minces.

Cela posé, exerçons sur P′ un effort convenable, de manière à le déplacer parallèlement à P. L'équilibre se trouve rompu entre les forces qui agissaient de P à P′. Mais si nous arrivons à placer P′ de telle sorte que les nœuds en soient situés, relativement à ceux de P, dans une position symétrique, par rapport au plan parallèle mené à égale distance de P et de P′, c'est-à-dire a_1, b_1, c_1, d_1, l'équilibre pourra être obtenu de nouveau, du moins pour un écartement convenable des deux plans. En effet, pour cet écartement, les composantes, normales aux plans, des actions exercées entre P et P′ seront nécessairement nulles ; et il en sera de même des composantes parallèles aux plans ; car à toute action exercée sur une particule en correspond une autre, qui donne une composante parallèle, égale et contraire à celle de la première.

Il suffira donc de pousser le plan P′ de manière à lui faire dépasser, d'une quantité convenable, la position d'*équilibre réticulaire*, qui eût fait de l'ensemble un cristal unique, pour qu'il vienne se placer de lui-même dans la seconde position, que nous pouvons appeler celle de l'*équilibre de macle*.

Équilibre de macle. — Ce n'est pas à dire pour cela qu'une macle doive se produire nécessairement. En effet, lorsque le plan P′ aura été amené dans la position $a_1\, b_1\, c_1\, d_1$, il pourra se faire qu'il s'y développe un second réseau, dont les rangées, parallèles à celles du premier, partiront des nœuds a_1, b_1, c_1, d_1, etc., prenant les positions $a_1\, a_2$, b_1, b_2, $c_1\, c_2$, $d_1\, d_2$, etc. Alors il ne se pro-

duira qu'un ressaut physiquement inappréciable, dans la position des rangées réticulaires, toutes déplacées de la même quantité $a_1 b'$.

Mais le réseau développé sur P' pourra prendre la position $a_1 a'_2$, $b_1 b'_2$, etc., symétrique de *a b c d* relativement à P'. Et ainsi le second élément de la macle sera symétrique du premier relativement au plan de juxtaposition. Ce dernier cas est le seul qui se prête à l'observation. Il donne lieu à la formation de macles par accolement ou juxtaposition, et il est aisé de comprendre pourquoi ces macles ont été généralement considérées comme le résultat d'une *hémitropie*, c'est-à-dire d'une rotation de 180 degrés, subie par l'un des individus de la macle autour de la normale au plan de jonction. En effet, soit π le plan médian, mené à égale distance des plans P et P'. Un point tel que α, situé dans π à l'intersection de deux rangées symétriques, αa, αa_1, est un centre de symétrie de chacun des deux réseaux, comme du polyèdre formé par leur superposition. D'ailleurs π est un plan de symétrie de ce polyèdre. On déduit de là, par un théorème connu, que αA, normal à π, est un axe binaire du même polyèdre, d'où il suit que le second système réticulaire peut s'obtenir en faisant tourner le premier de 180° autour de la normale au plan de macle.

Mais, comme l'a remarqué Mallard, l'introduction, dans la théorie, des *axes* et des *plans d'hémitropie*, n'a aucune utilité. La rotation hémitrope ne correspond pas à un mouvement effectué par le second cristal et peut donner une idée fausse de sa génération. Si donc, dans la description des espèces, pour obéir à l'usage, nous conservons ces dénominations, il doit être entendu qu'elles sont simplement figuratives et ne répondent à rien de réel.

Causes physiques de la production des macles. — Avant d'aller plus loin, il convient de faire observer que cette conception dynamique des macles n'est pas une pure hypothèse, simplement justifiée par la géométrie. On peut dire qu'elle est vraiment réalisée dans la remarquable expérience de M. Baumhauer.

M. Reusch avait constaté, comme nous l'avons dit plus haut, que si, sur deux arêtes *d* opposées d'un rhomboèdre de calcite, on taille des facettes parallèles à d^1, et que l'on comprime le cristal entre ces deux plans, on voit miroiter, dans l'intérieur, des surfaces parallèles au rhomboèdre b^1. Il s'était également assuré que, pourvu qu'une de ces faces de glissement ne traversât pas toute l'épaisseur du cristal, on pouvait la faire disparaître en chauffant ce dernier.

Cette expérience a été modifiée par M. Baumhauer, et est devenue entre ses mains une des constatations les plus suggestives de la minéralogie. Un rhomboèdre de clivage de spath d'Islande, de forme allongée suivant une des arêtes culminantes, est placé (fig. 335) de telle sorte que cette arête soit horizontale, le prisme reposant sur un support par l'arête opposée. On y appuie normalement et progressivement la lame d'un canif, et l'on voit bientôt cette lame pénétrer comme dans un corps mou en séparant, sur le côté, une portion de cristal que limite une surface plane parallèle à b^1. De plus, cette portion

s'incline en sens inverse et se comporte, vis-à-vis du reste du cristal, comme un individu d'orientation symétrique. Cependant les nouvelles faces, de formation toute mécanique, ont un poli si parfait qu'il est impossible de les distinguer des faces non modifiées. Il est donc évident que la lame tranchante, en pénétrant dans le prisme, a chassé d'un même côté, successivement, chacun des plans réticulaires horizontaux qu'elle rencontrait, en faisant prendre aux particules une position symétrique.

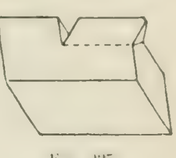


Fig. 335.

Il est vrai que, dans un liquide en voie de cristallisation tranquille, il ne peut être question d'actions mécaniques. Mais alors la principale cause pour laquelle des parties contiguës d'un liquide en voie de cristallisation ne prennent pas identiquement la même orientation paraît résider dans la viscosité du milieu. Pour que la solidification d'un corps donne lieu à un cristal unique et homogène, il faut que les particules, qui sont l'élément initial de la cristallisation, puissent tourner librement autour de leurs centres de gravité, sous l'action des forces que la forme de ces polyèdres atomiques met en jeu. M. O. Lehmann a montré que si, à une dissolution de chlorure de baryum, qui habituellement ne donne que des cristaux simples, on ajoute une substance qui épaississe la liqueur, *il ne se produit plus que des cristaux maclés*. Pour l'expliquer, il faut admettre qu'au moment où une particule arrive dans la sphère d'action du cristal en voie d'accroissement, la résistance du liquide mettant obstacle à sa rotation, elle tend à exécuter le moins possible de mouvement. Comme il n'y a que deux positions d'équilibre admissibles, celle d'équilibre réticulaire et celle de macle, les particules choisiront, entre les deux, celle dont elles sont actuellement le plus voisines. Toutes les fois que ce sera la position symétriqne, il en résultera une macle (1).

Macles des cristaux holoédriques. — Poursuivons l'examen des conditions des macles. Jusqu'ici nous avons raisonné comme si les particules étaient réduites à leurs centres de gravité. Introduisons maintenant la considération des polyèdres particulaires et voyons quelles conséquences vont résulter de leur mouvement. Nous aurons à distinguer successivement le cas des cristaux holoédriques et celui des cristaux hémiédriques.

Si le cristal considéré est holoédrique, la position du réseau définit complètement celle de la particule et par conséquent celle de l'édifice cristallin, c'est-à-dire du système réticulaire dont chaque nœud porte une particule. Les deux édifices de la macle sont donc symétriques relativement à π. Ainsi, *pour les cristaux holoédriques, les deux cristaux juxtaposés sont symétriques par rapport au plan de macle.*

Macles des cristaux mériédriques. — Supposons maintenant qu'il s'agisse d'un cristal mériédrique, c'est-à-dire, comme on sait, d'un cristal dans

(1) Groth, *Festrede*, Münich, 1888.

lequel les particules ne sont pas pourvues de la totalité des éléments de symétrie du réseau. Après que la position de ce dernier a été fixée, il reste (en admettant que nous ne nous occupions ici que des cas d'*hémiédrie*) deux orientations distinctes à donner aux particules de chaque nœud; ce qui, pour un même système réticulaire, fait naître deux édifices cristallins différents. De ces deux édifices conjugués, l'un est symétrique de l'autre par rapport à l'un des éléments de symétrie *déficients*. Car nous savons (1) que toute forme holoédrique F se décompose, en général, par l'effet de l'hémiédrie, en deux demi-formes f, f', conjuguées l'une de l'autre et dont l'une, qu'on peut appeler positive, est symétrique de la demi-forme négative par rapport à un élément de symétrie déficient. Cela étant, si l'édifice cristallin situé à gauche du plan de macle était holoédrique, c'est-à-dire portait la forme totale F, composée de $+f$ et de $-f'$, celui de droite porterait la même forme totale F_1, composée de $+f_1$ et de $-f_1'$. Et F_1 serait symétrique de F par rapport au plan de macle.

Donc, dans le cas de l'hémiédrie, la demi-forme f, qui existe seule à gauche, aura pour symétrique, soit f_1, soit f'_1, suivant celle des deux orientations possibles qu'on aura données au polyèdre moléculaire.

En résumé, *dans un cristal hémiédrique maclé, les faces d'une des demi-formes conjuguées ont pour symétriques, de l'autre côté du plan de macle, les face de la demi-forme de même signe ou celles de la demi-forme de signe contraire.*

Évidemment, des deux orientations particulaires possibles, l'une sera réalisée si l'on admet que, dans une hémitropie ou rotation de 180 degrés autour de la normale au plan de juxtaposition, le réseau prolongé du cristal de gauche entraîne les particules, supposées invariablement liées avec lui. Dans cette solution, qu'on peut appeler *hémitrope*, la rotation de 180° autour de la normale au plan de macle amène le cristal de gauche prolongé à se trouver en superposition avec le cristal de droite.

L'autre solution consiste à prendre, pour le second cristal, l'orientation symétrique de la première par rapport à un élément déficient. Dans ce cas, la rotation hémitrope n'amène plus la coïncidence des deux édifices.

Mais il convient d'aller plus loin et d'examiner en détail ce qui se passe pour chacun des trois modes principaux d'hémiédrie.

Influence des différents modes mériédriques. Polyèdres holoaxes et hémiaxes non centrés. — Le premier cas est celui des polyèdres particulaires *holoaxes hémisymétriques*. Les deux édifices cristallins conjugués sont symétriques relativement au centre de symétrie déficient et ne sont pas superposables. En pareil cas, la solution hémitrope, qui donne évidemment deux cristaux superposables, ne peut faire naître, à droite de la figure, un édifice symétrique de celui de gauche relativement au plan de

(1) V. plus haut, p. 68.

macle. Ce genre de juxtaposition se rencontre dans le sucre, avec h^1 pour plan de macle.

En revanche, la seconde solution donnera deux cristaux symétriques, l'un droit, l'autre gauche, comme cela arrive pour le chlorate de soude.

Dans le cas des cristaux *hémiaxes non centrés*, une demi-rotation autour d'un axe binaire déficient donne un polyèdre conjugué du premier et, par conséquent, superposable à celui-ci.

Dans la solution hémitrope, les deux demi-formes de même signe, f et f_1, ne sont pas symétriques relativement au plan de macle. Car l'édifice n'étant pas centré, ce plan n'est pas un plan de symétrie. La demi-forme positive f a pour symétrique la demi-forme négative f'_1. Il y a donc hémitropie, mais il n'y a pas symétrie par rapport au plan de macle.

Pour obtenir cette symétrie, il faut faire tourner l'édifice, déjà réalisé, de 180° autour d'un axe binaire déficient. Alors f a bien pour symétrique f_1 relativement au plan de macle.

Cette solution symétrique exige deux hémitropies successives, l'une autour de la normale au plan de macle, la seconde autour d'un axe binaire déficient. Or ces deux demi-rotations successives autour d'axes concourants peuvent se composer en une seule rotation autour d'un axe unique. Il suffit d'appliquer la *règle* dite *d'Euler*, dont nous rappellerons l'énoncé. Soit A (fig. 336) le pôle, sur une sphère, de l'axe d'une rotation d'angle α, et B le pôle du second axe, autour duquel l'angle de rotation est β. Faisons sur la sphère, avec AB, en A, un angle égal à $\frac{\alpha}{2}$ et, en B, un angle égal à $\frac{\beta}{2}$. Les deux arcs de grands cercles ainsi obtenus se couperont en C, sous un angle égal à $\frac{\gamma}{2}$. Cela posé, C est le pôle de l'axe de la rotation résultante et γ est l'amplitude de cette rotation.

Dans le cas qui nous occupe, celui de deux hémitropies successives, les deux angles $\frac{\alpha}{2}$ et $\frac{\beta}{2}$ sont égaux à 90° (puisque les rotations correspondantes sont de 180°), et, par conséquent, la rencontre des arcs AC et BC a lieu au *pôle* C du cercle AB. Dès lors, l'axe résultant, qui aboutit en C, est perpendiculaire aux deux axes d'hémitropie. Mais l'angle $\frac{\gamma}{2}$ peut être quelconque. Pour qu'il soit de 90 degrés, il faut que le triangle ABC soit *trirectangle*, c'est-à-dire que l'arc AB soit égal à un quart de circonférence. Cela revient à dire que l'axe B (dans notre hypothèse, c'est l'axe binaire déficient du système) doit être perpendiculaire à l'axe d'hémitropie A. Il est donc situé *dans le plan de jonction*, qui est normal à l'axe A. Et alors il en est de même de l'axe C, perpendiculaire à la fois à A et à B.

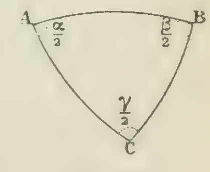


Fig. 336.

On peut ainsi poser en principe que, *si l'axe binaire déficient est contenu*

dans le plan de macle, la rotation qui résulte des deux hémitropies successives sera elle-même hémitrope, et ainsi le second édifice semblera avoir tourné de 180°, non autour d'un axe normal au plan de macle, mais autour d'une ligne située dans ce plan. C'est, en particulier, le cas de la *macle de Carlsbad*, dont il a été question précédemment, et c'est ainsi qu'on avait été conduit à distinguer deux sortes d'hémitropies, les unes *normales*, de beaucoup les plus fréquentes, et les autres *parallèles*, c'est-à-dire dont l'axe est parallèle au plan de macle, au lieu de lui être perpendiculaire. Mais il est infiniment plus simple de laisser de côté, comme a fait Mallard, la considération, tout artificielle, des axes d'hémitropie et de définir les deux modes de groupement en appelant le premier *mode non symétrique* et le second *mode symétrique*.

Exemples de macles non symétriques. — Comme exemples du premier mode, on peut citer les cristaux de blende, substance qui possède l'hémiédrie tétraédrique du système cubique. La figure 337 montre deux cristaux accouplés, formés chacun de la combinaison du cube p avec les deux tétraèdres conjugués, d'une part $\underline{a}^1$ et $\underline{a}^1_,$, d'autre part a^1 et $a^1_,$. Le plan de macle est une face octaédrique a^1, et sa trace est mise en évidence par un trait plus fort. Au premier aspect, on pourrait croire à une macle du second mode, car la figure est géométriquement symétrique. Mais on s'aperçoit bientôt que c'est un tétraèdre à faces polies a^1, qui correspond, de l'autre côté du plan de macle, à un tétraèdre strié $\underline{a}^1$.

Dans la figure 338, deux cristaux formés de b^1 et de l'hémitrapézoèdre a^3 sont encore maclés suivant une face a^1 et le groupement n'est symétrique ni géométriquement ni physiquement.

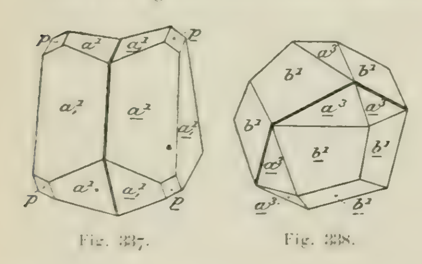


Fig. 337. Fig. 338.

Dans les deux cas, on peut imaginer qu'il y a eu rotation de 180° autour de l'axe normal à a^1 et, comme cet axe est ternaire, cela équivaut simplement à une rotation effective de 60 degrés. Mais ce n'est qu'une manière arbitraire de figurer le résultat géométrique de cette macle non symétrique.

Exemples de macles symétriques. — Le cuivre gris, également tétraédrique, offre un exemple de macle symétrique ou du second mode, d'autant plus intéressant qu'avant que Mallard l'eût rattaché à sa théorie, on n'en pouvait rendre compte que d'une manière très compliquée. Cette macle se compose (fig. 339) de deux tétraèdres a^1, $\underline{a}^1$, dont, en général, les arêtes portent en biseau les faces du dodécaèdre trigonal direct a^2, tandis que sur les sommets figurent, avec les faces du rhombododécaèdre b^1, celles du dodécaèdre trigonal inverse

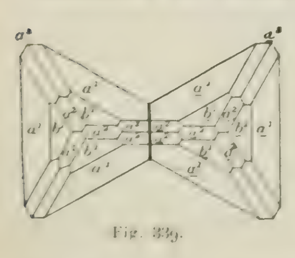


Fig. 339.

$a^2_{,}$. Les deux tétraèdres, ayant leurs bases dans un même plan (placé horizontalement dans la figure), sont soudés par une face commune, parallèle à celui des axes ternaires qui est ici vertical.

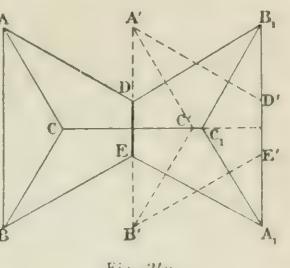


Fig. 340.

Pour expliquer cette macle, simplifions la figure en laissant de côté les formes b^1, a^2 et $a^2_{,}$, et imaginons (fig. 340) deux tétraèdres identiques, ABCDE, A'B'C'D'E', tronqués comme les précédents et d'abord placés bout à bout dans des situations semblables.

Le plan de troncature est parallèle à un axe ternaire; mais il est aussi parallèle à l'arête tétraédrique horizontale (AB, A'B'), située de l'autre côté. Or nous savons que cette arête a la direction d'un axe binaire déficient. Ainsi la forme à laquelle appartient le plan de troncature est à la fois parallèle à un axe binaire et parallèle à un axe ternaire. Donc c'est le trapézoèdre a^2.

Faisons tourner le second tétraèdre de 180° autour d'un axe normal à ce plan a^2. Sa base va venir en l'air, sa pointe C' étant tournée en bas, et les points A' et B' permutant ensemble. Ensuite imprimons-lui une seconde rotation hémitrope autour d'une parallèle à AB (axe binaire déficient), lequel peut être considéré comme situé dans le plan de macle. La base va revenir en bas, mais en se retournant. La pointe sera en C, et le cristal, venu en $A_1B_1C_1DE$, sera exactement symétrique du premier, de sorte que les deux tétraèdres, ayant leurs bases dans un même plan, paraîtront soudés latéralement par leurs troncatures.

Ces deux rotations successives équivalent, d'après ce que nous avons déjà vu, à une rotation unique, de 180 degrés, autour d'un axe vertical situé dans le plan a^2 et qui est, par conséquent, la parallèle à l'axe ternaire du tétraèdre projeté en C.

D'après le langage usité chez les cristallographes allemands, il eût fallu distinguer : 1° l'axe de l'hémitropie (ternaire); le plan d'hémitropie (a^1), normal à l'axe; 3° le plan de jonction qui, confondu dans le cas de la blende avec le plan d'hémitropie, lui devenait perpendiculaire dans le cas du cuivre gris, en prenant la notation a^2. Avec la théorie de Mallard, il suffit tout simplement de dire que c'est une *macle symétrique* de deux tétraèdres, avec a^2 pour plan de juxtaposition.

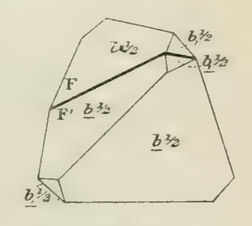


Fig. 341.

A côté de cette macle symétrique de deux tétraèdres de cuivre gris, il est bon de placer un exemple analogue qui nous est offert par la chalcopyrite ou pyrite de cuivre, substance quadratique hémiaxe et non centrée. Ce sont (fig. 341) deux sphénoèdres, $b^{\frac{1}{2}}$ et $\underline{b}^{\frac{1}{2}}$, tronqués par leurs inverses, $b_{\cdot}{\frac{1}{2}}$ et $\underline{b}_{\cdot}{\frac{1}{2}}$, et

qui viennent se macler symétriquement, par rapport à un plan de notation a^1. Comme le sphénoèdre de la chalcopyrite diffère un peu du tétraèdre régulier, l'écartement des pôles $b\frac{1}{2}$ n'est plus exactement le même que pour le cuivre gris; la zone mb^1 n'est plus perpendiculaire sur la normale à $b\frac{1}{2}$, et le plan de juxtaposition a^1, qui fait partie de cette zone, n'est plus rigoureusement perpendiculaire sur le plan $b\frac{1}{2}$. Aussi les deux faces symétriques, F et F', ne sont-elles pas tout à fait dans un même plan. D'ailleurs, le plan de jonction a^1 ne contient pas d'axe binaire déficient. Une hémitropie autour de la normale à a^1, suivie d'une autre hémitropie autour de l'axe déficient (qui n'est plus dans a^1), donnera un axe résultant qui ne coïncidera pas exactement avec la normale à $b\frac{1}{2}$, et pour lequel l'angle de rotation ne sera qu'à peu près de 180 degrés. Et voilà comment cette macle symétrique si simple deviendrait inexplicable avec la conception usuelle des hémitropies.

Polyèdres hémiaxes centrés. — Occupons-nous enfin des cristaux *hémiaxes centrés.* Dans ce cas, la normale au plan de juxtaposition étant un axe de symétrie d'un édifice centré, le plan de macle est un plan de symétrie et la solution hémitrope donne deux cristaux symétriques.

L'édifice cristallin étant amené dans cette seconde position, on peut encore le faire tourner de 180 degrés autour d'un axe binaire déficient. Les deux rotations se composent en une seule, dont l'axe est situé dans le plan de macle, mais qui n'est hémitrope, c'est-à-dire de 180 degrés, que si l'axe déficient est lui-même contenu dans le plan de macle. Ici donc, par rapport à ce plan, c'est le second mode qui donne un édifice dyssymétrique, tandis que le premier donne un ensemble symétrique.

Laissant de côté le cas, d'ailleurs si rare, des cristaux tétartoédriques, on peut résumer tout ce qui vient d'être dit en répétant que, dans les macles par juxtaposition, l'hémitropie n'est qu'une fiction. Une macle de ce genre est complètement définie, dans le cas des cristaux holoédriques, par l'indication de la face à laquelle le plan de macle est parallèle. Dans le cas des cristaux hémiédriques, il suffit d'ajouter à cette indication si la macle est symétrique ou dyssymétrique.

§ 3

THÉORIE DES MACLES DE MALLARD.
2° MACLES PAR PÉNÉTRATION

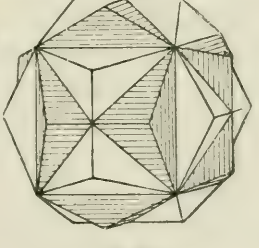
Groupements autour d'un axe. — Ce qui caractérise les groupements par pénétration, c'est que la surface par laquelle sont séparés les deux individus cristallins, d'orientations différentes, n'est plus une surface plane. Comme types de ce mode de groupement, on peut citer la *macle de la croix de fer* des

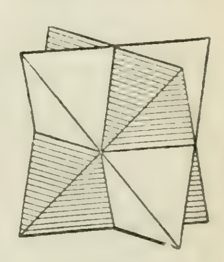
cristaux de pyrite, la *macle en croix* de la staurotide; la macle des cristaux d'orthose dite *macle de Carlsbad*, etc.

Dans tous les cas de ce genre, ainsi que l'a montré Mallard, l'analyse expérimentale des conditions du groupement montre qu'on peut passer d'un édifice cristallin à l'autre, soit en prenant le symétrique du premier relativement à un point, soit en le faisant tourner de $\frac{2\pi}{n}$ (n étant 2, 3, 4, ou 6), autour d'une rangée du système réticulaire, que l'on peut appeler l'*axe du groupement.*

Quant aux conditions que doit remplir cet axe, l'observation va nous les indiquer. Considérons d'abord la *macle de la croix de fer* (fig. 342). La pyrite est une substance à polyèdre particulaire hémiaxe, dont les axes quaternaires sont descendus au rang d'axes binaires. Or il est aisé de voir que le second cristal dérive du premier par une rotation de 90° autour d'une parallèle à une arête cubique, c'est-à-dire à un axe quaternaire déficient. Donc, dans ce cas au moins, l'*axe de groupement est un axe de symétrie du système réticulaire* et, si l'on fait abstraction un moment de l'orientation des particules, pour ne considérer que le système réticulaire, on voit que ce dernier *se poursuit d'un édifice à l'autre.* Ainsi les deux cristaux ont le même réseau. Seules, les particules y sont différemment orientées.

Nous allons retrouver identiquement la même règle dans la macle par pénétration de deux cristaux tétraédriques, soit de cuivre gris, soit de diamant (fig. 343). Dans ce cas encore, il est clair qu'il s'agit d'une rotation de 90 degrés autour d'un axe quaternaire *du système* (et non des cristaux).


Fig. 342.


Fig. 343.

Groupements de deux sortes de particules. — C'est encore un groupement par pénétration, avec identité du système réticulaire, que celui de certains cristaux de quartz, dans lesquels des parties *dextrogyres* s'enchevêtrent avec des parties *lévogyres* Les particules des cristaux dextrogyres sont symétriques de celles des autres et ne leur sont pas superposables. Ce sont donc des matériaux dissemblables, quoique de même nature chimique. Mais, dans le quartz, les deux sortes de particules peuvent coexister (ce qui n'est pas le cas de tous les corps hémisymétriques). Elles cristallisent donc ensemble, sur les nœuds d'un même assemblage, dont les rangées et les axes se poursuivent sans déviation à travers tout le cristal; seulement, parmi les nœuds, les uns sont occupés par des particules *directes* et les autres par des particules *inverses.* C'est ce que Bravais avait appelé *inversion moléculaire.* En pareil cas, la pénétration est plus intime que pour tout autre mode de groupe-

ment et une section de cristal se divise en *plages* distinctes, à contours irrégulièrement délimités, dont chacune ne contient qu'une des deux espèces de particules.

La figure 344, empruntée à M. Tschermak, représente la projection d'un pointement birhomboédrique de quartz avec six facettes plagièdres, dont trois appartiennent à l'un des groupes composants et trois à l'autre. Les faces p du premier groupe ayant été désignées par 1 et ses faces $e^{\frac{1}{2}}$ par 2, les chiffres accentués 1′ et 2′ désignent respectivement les faces correspondantes du second groupe, et l'on peut remarquer à quel point est capricieux le contour des plages.

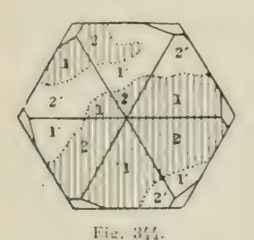


Fig. 344.

Sur un cristal offrant cette structure, les faces rhombes et plagièdres, au lieu d'apparaître seulement aux deux extrémités de trois arêtes alternantes du prisme e^2, pourront se montrer (ce qui est le cas de la figure) sur les six arêtes à la fois. Ici il n'y a pas, comme dans les exemples précédents, rotation de l'un des individus (ou pour mieux dire, rotation de l'une des catégories de particules) autour d'un axe déficient, mais restitution, pour une portion des particules, du polyèdre inverse, relativement au centre qui faisait défaut.

Macles de la staurotide. — Ainsi mis sur la voie de la loi des groupements, arrivons au cas de la staurotide. Cette substance n'est pas quadratique, et pourtant la macle cruciforme en croix grecque est produite par une rotation de 90° autour de l'un des axes binaires du réseau rhombique. Voici l'explication que donne Mallard de cette particularité : Si, avec lui, on change l'orientation habituelle des cristaux, de manière à appeler g^1 ce qui portait autrefois la notation p, et $a^{\frac{3}{2}}$ ce qui s'appelait m, on trouve que le rapport d'axes de la staurotide devient à peu près R. A. $= 1 : \sqrt{2} : \sqrt{2}$.

C'est justement le rapport d'un axe quaternaire du noyau cubique aux deux axes binaires qui lui sont perpendiculaires. On peut donc dire que la staurotide est *pseudo-cubique*. Cette espèce rentre dans la catégorie (d'ailleurs très nombreuse, ainsi que nous le verrons) des corps à *symétrie-limite*, c'est-à-dire dont les éléments de symétrie s'écartent très peu des valeurs qui conviendraient pour les faire passer dans un système cristallin d'ordre plus élevé.

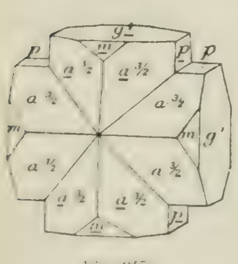


Fig. 345.

Ce point admis, il est visible que l'axe horizontal parallèle à pg^1, celui-là même autour duquel a lieu la rotation de 90°, est *pseudo-quaternaire*. La macle cruciforme (fig. 345) est donc produite par la rotation de l'un des édifices cristallins autour d'un axe de *pseudo-symétrie* du réseau *à peu près commun* aux deux édifices.

La staurotide elle-même va nous fournir une seconde application de la règle.

En effet, cette espèce n'offre pas que la macle en croix grecque. Souvent deux cristaux d'apparence prismatique sont groupés en croix de Saint-André (fig. 346), leurs arêtes homologues faisant entre elles des angles de 60 degrés.

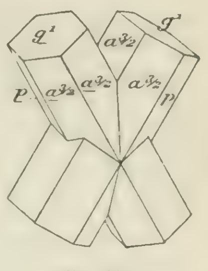


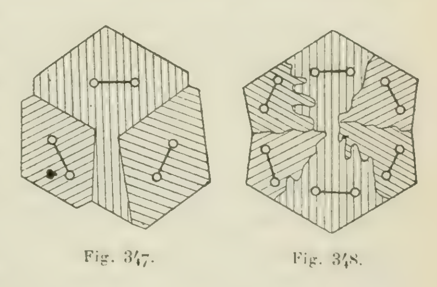
Fig. 346.

Une explication semblable à la précédente convient à ce nouveau cas. Il suffit de se rappeler que, si le cristal est pseudo-cubique, outre les deux axes pseudo-binaires normaux, l'un à p, l'autre à g^1, il doit y en avoir quatre autres, inclinés de 60° sur les précédents. Ces axes sont alors respectivement normaux aux faces de la pyramide fondamentale $b^{\frac{1}{2}}$; car on a, dans l'espèce, $pb^{\frac{1}{2}} = 120°14'$, d'où il suit que la perpendiculaire à $b^{\frac{1}{2}}$ fait un angle de 60° environ avec les normales à p et à g^1. Une rotation de 180° autour de l'un des quatre axes normaux à $b^{\frac{1}{2}}$ est donc admissible. Or, après une telle rotation, l'arête $pa^{\frac{3}{2}}$, parallèle à la macrodiagonale ph^1, doit continuer à faire un angle de 60° avec l'axe d'hémitropie, c'est-à-dire qu'elle fait aussi un angle de 60° avec sa position primitive.

Donc il y a eu rotation autour d'un axe de pseudo-symétrie du réseau *à peu près commun aux deux édifices* cristallins superposés.

Idée de la symétrie-limite. Macles de l'aragonite. — De là nous pouvons inférer, tout au moins comme premier aperçu, que les *cristaux à symétrie-limite* ont une tendance à mélanger ensemble les diverses orientations moléculaires qu'ils peuvent prendre, si l'on envisage leurs axes comme des lignes de symétrie *réelle*.

Cette règle trouve une vérification immédiate dans le cas de l'aragonite ou carbonate de chaux rhombique. L'angle du prisme mm de cette espèce est de 116° 10′, et par conséquent la symétrie du réseau est très voisine de la symétrie ternaire. Or, à côté des macles par accolement que nous avons antérieurement rappelées, l'aragonite offre des macles par pénétration, avec axes verticaux parallèles, où l'on observe, à peu de chose près, les trois orientations que le réseau peut recevoir autour de l'axe vertical pseudo-ternaire. On en aura une idée par les figures 347 et 348, qui représentent la section droite de divers cristaux, et où la direction du plan des axes optiques est indiquée par une ligne que terminent deux petits cercles. Tantôt les plages d'orientations diverses sont limitées par des lignes droites, les cristaux composants étant accolés suivant les faces m ou g^2, tantôt les contours sont irréguliers et dentelés, attestant un mélange encore plus intime des trois orientations admissibles.


Fig. 347. Fig. 348.

Macle de Carlsbad. Macle de la fluorine. — Une autre vérification du principe semble se trouver dans la facilité avec laquelle il permet d'expliquer la macle de Carlsbad (voir fig. 329). En effet, comme l'a montré Mallard, si, d'après les chiffres donnés par les auteurs, on construit le parallélogramme générateur du plan de symétrie de l'orthose, on trouve que, ses côtés OH et OA (fig. 349) étant respectivement égaux à 464 et à 550 et comprenant entre eux un angle de 116°7′, la plus courte diagonale OD du parallélogramme résultant est égale à 541,5, c'est-à dire presque identique avec le côté OA, parallèle à la base du cristal. Si donc on prend, pour maille du plan g^1, le parallélogramme OADC, construit sur OA et sur OD, cette figure sera presque un losange; la diagonale OC sera presque perpendiculaire sur AD, parallèle à OH, c'est-à-dire à l'arête *mm*, et ainsi cette dernière est un axe *quasi-binaire* du réseau de g^1, ce qui lui permet de servir d'axe d'hémitropie.

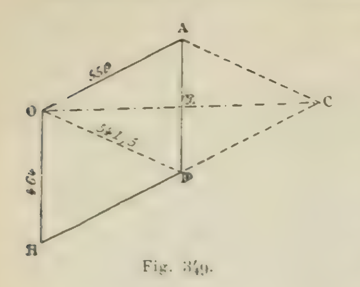
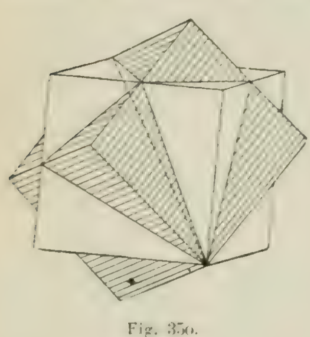


Fig. 349.

Il y a bien une macle par pénétration qui semble échapper à cette loi : c'est celle, si fréquente dans la fluorine, où deux cubes se pénètrent mutuellement (fig. 350), ayant en commun une diagonale cubique, c'est-à-dire un axe ternaire, autour duquel l'un des individus a tourné, relativement à l'autre, de 60 degrés. Le numéro d'ordre de l'axe n'autorise pas cette rotation, qui équivaut à une hémitropie.


Fig. 350.

Mais l'objection tombe si, avec Mallard, on admet, sur la foi des phénomènes optiques et des stries de l'espèce, que la fluorine est seulement pseudo-cubique et que sa véritable symétrie se rapproche du système hexagonal, avec la diagonale du cube pour axe pseudo-sénaire. Dans ce cas, en effet, trois rotations successives, de 60 degrés chacune, donnent une hémitropie.

Macles de l'albite et du disthène. — Nous voilà donc en possession d'une loi expérimentale très simple, d'ailleurs facile à justifier rationnellement, qui règle tous les groupements par pénétration connus.

Mais on peut aller plus loin et y faire rentrer aussi des macles par accolement, comme celles de l'albite, du péricline, du disthène, etc.

En effet, dans la macle de l'albite, le plan g^1 diffère peu d'un plan de symétrie (les éléments cristallographiques de l'espèce étant très voisins de ceux de l'orthose ou feldspath monoclinique). Par conséquent la normale à g^1, qui est l'axe d'hémitropie de la macle, est, à peu de chose près, un axe pseudo-binaire.

Il en est de même de l'arête ph^1, autour de laquelle se fait l'hémitropie qui détermine la macle du péricline. Cette ligne diffère peu d'une normale à g^1, c'est-à-dire d'un axe pseudo-binaire.

Considérons maintenant les macles du disthène. Cette espèce est triclinique, mais pseudo-rhombique. Elle offre trois sortes de macles, toutes trois avec h^1 pour plan de jonction. La première est une hémitropie avec axe normal à h^1. La seconde serait une hémitropie parallèle avec ph^1 pour axe. Enfin la troisième est encore une hémitropie parallèle autour de $g^1\ h^1$. Or les trois directions qui viennent d'être indiquées sont justement, pour le disthène, des axes pseudo-binaires et la rotation autour de ces axes est conforme à la règle indiquée.

On voit par là qu'il peut exister un lien assez étroit entre les macles par juxtaposition et les groupements par pénétration. La chose s'explique du reste sans peine. Car si un cristal possède un axe de pseudo-symétrie, les deux orientations admissibles du réseau peuvent se juxtaposer aussi bien suivant une surface irrégulière que suivant un plan d'orientation convenable, par rapport auquel les deux réseaux seront symétriques. Et c'est ainsi que l'Aragonite nous a offert un exemple de la coexistence de ces deux manières d'être. Il en serait de même des autres substances à symétrie pseudo-hexagonale.

Groupements autour d'un point. Grenat. Boracite. — Il nous reste à parler des cristaux qui se groupent autour d'un point. Ce cas est réalisé, d'après Mallard, par les variétés de grenat appelées *Topazolite* et *Pyrénéite*, ainsi que par la boracite ou magnésie boratée.

L'examen optique de la Pyrénéite et de l'Ouwarowite montre que les dodécaèdres rhomboïdaux de ces deux espèces sont en réalité formés par l'accolement, autour d'un même point, de douze pyramides rhombiques, dont les éléments satisfont presque entièrement à la symétrie cubique, de telle sorte que les douze pyramides, par leur groupement, arrivent à remplir tout l'espace sans vides appréciables. Cette conception n'est d'ailleurs pas une manière plus ou moins arbitraire d'interpréter les anomalies optiques du grenat; car M. Em. Bertrand a réussi à isoler mécaniquement les pyramides composantes. Quant aux dodécaèdres de Topazolite, on a depuis longtemps remarqué que leurs faces portaient des pyramides très surbaissées à quatre facettes, plus ou moins irrégulières. Ce phénomène, reconnu sur divers cristaux par M. Scacchi, a été désigné par lui sous les noms de *Polyédrie* et de *Polysymétrie*. Mais l'examen optique montre qu'une plaque de la substance, taillée suivant les faces du dodécaèdre, se divise en quatre secteurs, limités par des droites parallèles aux diagonales de la base rhombe. Par là on est conduit à croire que le grenat topazolite est triclinique et à décomposer le dodécaèdre à faces quadruples en quarante-huit pyramides, se groupant quatre par quatre de manière à constituer douze orientations distinctes. Or une maille imparfaitement cubique peut recevoir douze positions différentes, puisqu'elle a douze arêtes non identiques. Donc l'association des quarante-huit pyramides tricli-

niques réalise toutes les orientations que peut prendre le réseau pseudo-cubique de la substance.

Mais comment expliquer qu'une même espèce, comme le grenat, puisse être, tour à tour, optiquement triclinique, rhombique et même cubique, puisque certaines variétés, comme les grenats trapézoédriques du Tyrol et les grenats mélanites d'Arendal, sont absolument uniréfringentes ? Cela semble très facile, si l'on se rappelle que les diverses positions du réseau peuvent, ou se juxtaposer avec des contours nets, ou s'enchevêtrer d'une manière confuse. Si ce dernier cas se réalise, le mélange intime des diverses orientations produira l'effet d'un corps isotrope. Si le mélange est moins complet, on verra se manifester une symétrie intermédiaire, simplement rhombique. Enfin les plages d'inégale orientation pourront demeurer assez distinctes pour que la symétrie triclinique se laisse voir, comme dans la variété topazolite.

La Boracite a passé autrefois pour un type de cristallisation cubique, avec hémiédrie tétraédrique. Cependant on sait depuis longtemps que les cristaux de boracite agissent sur la lumière polarisée. En étudiant les détails de ce phénomène, Mallard a reconnu que ces cristaux étaient formés de douze pyramides groupées autour du centre et ayant pour bases les faces du rhombododécaèdre b^1. Chacune de ces pyramides n'est que rhombique et le polyèdre moléculaire est hémiaxe dichosymétrique (A^2, P', P''), ce qui entraîne l'hémimorphisme et, comme conséquence, la pyroélectricité.

Or les cristaux de boracite sont justement connus comme pyroélectriques. D'ailleurs, le véritable réseau de la boracite, bien qu'il n'ait pas rigoureusement la symétrie cubique, s'en écarte assez peu pour que la différence soit insensible aux observations goniométriques.

Hypothèse d'une tension cristalline. — Avant d'aller plus loin, il convient d'indiquer que tous les minéralogistes ne sont pas d'accord sur l'interprétation des anomalies optiques qui ont conduit Mallard à l'idée de la symétrie-limite. Il en est beaucoup, surtout parmi ceux de l'école allemande, qui attribuent la biréfringence de certains cristaux de forme cubique à l'influence de phénomènes d'ordre mécanique. Nous avons vu, en effet, qu'un corps isotrope, tel que le verre, était capable d'acquérir, par la trempe ou la compression, quelques-unes des propriétés des corps biréfringents. On a donc imaginé que certains cristaux, tels que ceux de leucite, de grenat, de boracite, pouvaient être, à l'intérieur, dans un état de tension ou de compression, qui les rendait actifs à l'égard de la lumière polarisée.

Sans nier que quelques-uns des phénomènes observés puissent être expliqués de cette manière, il importe de remarquer que l'existence d'une *trempe cristalline* paraît tout à fait inadmissible. Car la trempe est le résultat d'un brusque changement apporté dans les conditions de solidification d'un corps, tandis que la cristallisation témoigne d'un passage lent et tranquille de l'état liquide à l'état solide.

L'expérience prouve que des pressions de plusieurs kilogrammes par millimètre carré ne peuvent produire, dans les propriétés optiques d'un cristal, que des modifications temporaires. Comment concevoir l'existence de tensions encore plus fortes au sein d'une liqueur cristallisant tranquillement à la température ordinaire? De plus, pourquoi ces tensions ne s'exerceraient-elles jamais que sur des cristaux à formes-limites? Enfin, suivant une remarque, due comme les précédentes à M. Wyrouboff (1), si les cristaux offrant des anomalies optiques sont à l'état de corps comprimés ou trempés, ils doivent pouvoir, par une élévation de température, se détremper en revenant à leur état normal. Or, l'observation démontre qu'il n'en est pas ainsi, excepté pour les substances nettement polymorphes, dont il sera question un peu plus loin.

D'ailleurs, dans la majeure partie des cas étudiés, on peut briser les préparations de plaques minces et s'assurer que chaque fragment conserve les propriétés optiques qu'il possédait avant la rupture. Au contraire, un corps comprimé ou trempé laisse voir des figures d'interférence qui diffèrent suivant le point examiné. Enfin il est des cas où les éléments des cristaux complexes ont pu être isolés et étudiés et où chacun, examiné en lumière convergente avec le microscope de M. Bertrand, a montré des hyperboles et des franges d'interférence, qui ne permettaient aucun doute à l'égard de son caractère optique.

C'est pourquoi, tout en faisant la part des cas spéciaux qui peuvent réclamer une explication nouvelle, nous croyons préférable de s'en tenir, pour l'ensemble, à la théorie, aussi ingénieuse que féconde, par laquelle Mallard a su rattacher les anomalies optiques aux règles générales de la symétrie cristalline.

§ 4

GÉNÉRALITÉS SUR LES MACLES

Réalisation d'une symétrie supérieure à l'aide des macles : 1° macles par accolement. — Après cette rapide revue des principaux exemples de groupements cristallins, il convient d'en repasser dans notre esprit les traits fondamentaux, afin de voir si, en dehors des règles précises qui ont été formulées, il ne s'en dégage pas quelque notion générale, relativement à la raison d'être de ces groupements.

Nous avons bien vu, en étudiant les macles par juxtaposition, qu'il y avait un *équilibre de macle*, admissible au même titre que l'*équilibre réticulaire*. Mais pourquoi tant de cristaux, dont il semble que rien n'ait gêné le développement, paraissent-ils, en quelque sorte, affectionner cet équilibre de macle et préférer

(1) Wyrouboff, *Ann. de phys. et de chimie*, 6e série, VIII.

les édifices complexes aux constructions simples? La réponse à cette question paraît facile, si l'on envisage les combinaisons habituelles des cristaux monocliniques.

Prenons pour exemple le gypse. Le réseau de cette espèce n'a qu'un plan de symétrie, qui est g^1. La macle suivant h^1 (voir fig. 326) donne deux cristaux dont l'ensemble possède, en dehors de g^1, un autre plan de symétrie dans h^1. A la vérité ce dernier n'exerce sa fonction que relativement au groupe des deux cristaux, et non par rapport à leurs systèmes réticulaires. Il n'en est pas moins vrai que *l'ensemble a acquis, par le fait du groupement, une symétrie apparente plus élevée que celle du réseau fondamental.*

Mais les deux cristaux accolés de la figure 326 ne sont pas terminés de la même manière en haut et en bas. Il y a mieux à faire et ce mieux est justement réalisé par la combinaison de la figure 327, où l'ensemble possède trois plans de symétrie, savoir h^1, g^1 et le plan horizontal perpendiculaire aux deux précédents.

De même, la macle symétrique de l'orthose suivant p transforme cette base en un plan de symétrie pour l'ensemble des deux cristaux.

Ainsi les macles par accolement des espèces monocliniques accusent, de la part des cristaux, une tendance à la *recherche d'une symétrie plus élevée que celle de l'assemblage réticulaire* et, par conséquent, que celle de la particule.

Il en est exactement de même des macles entre individus tricliniques. Qu'est-ce que la macle en gouttière de l'albite, sinon la construction d'une sorte d'édifice monoclinique avec deux matériaux de symétrie inférieure? Et la même chose a lieu pour la macle du péricline comme pour celle du disthène. D'ailleurs, plus les cristaux maclés seront minces et plus l'édifice total se rapprochera de la condition où le placerait le mélange intime des deux orientations réticulaires. Aussi voyons-nous les feldspaths tricliniques rechercher particulièrement cette structure *polysynthétique*, qui fait de chaque cristal un assemblage de très minces lamelles hémitropes.

2° **Macles par pénétration**. — La règle que nous cherchons à mettre en lumière n'est pas moins frappante dans les groupements par pénétration. Dans la macle de Carlsbad, par exemple, on voit un réseau monoclinique et pseudorhombique prendre deux positions par rotation autour d'un axe pseudobinaire. En se superposant par enchevêtrement, ces deux orientations donnent un édifice dont le réseau est moins éloigné de la symétrie rhombique que ne l'était individuellement chacun des composants. En même temps donc que les deux cristaux, projetés sur g^1, donnent une figure symétrique par rapport à l'axe vertical et à la direction perpendiculaire, leur pénétration mutuelle rapproche le réseau total de la symétrie de degré supérieur. Le même fait se reproduit dans les cristaux d'aragonite et surtout dans ceux de grenat, où nous voyons un réseau, en réalité triclinique, arriver, par ce qu'on serait tenté d'appeler

une série de combinaisons habiles, à conquérir les dehors d'une symétrie cubique.

Moins avancés, mais tout aussi caractéristiques, sont les groupements que le microscope nous révèle dans le feldspath potassique dit Microcline. Cette espèce est triclinique, mais avec des éléments extrêmement peu différents de la symétrie monoclinique. Les lamelles minces, maclées suivant g^1, s'y enchevêtrent complètement avec celles maclées suivant la loi du péricline, produisant, dans les sections de la zone ph^1, un véritable quadrillage. Aussi peut-on penser qu'un mélange encore plus intime réaliserait une symétrie monoclinique complète; ce qui a conduit beaucoup de minéralogistes à admettre que l'orthose, ou feldspath potassique monoclinique, résultait d'une superposition enchevêtrée de lamelles de microcline, tellement minces qu'elles échapperaient au microscope.

La macle cruciforme de la staurotide fait ressortir la même tendance; car la croix grecque est évidemment une figure plus symétrique que celle des deux prismes modifiés qui la composent. Mais aucune espèce n'affiche, pour ainsi dire, la recherche du maximum de symétrie à un degré semblable à celui de la christianite (fig. 351), quand trois cristaux (d'ailleurs individuellement très complexes) s'assemblent de telle sorte dans la macle dite de Stempel, que leurs grands axes, qui sont

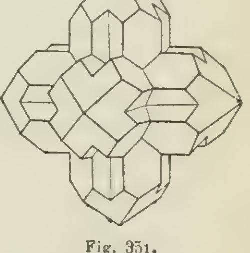
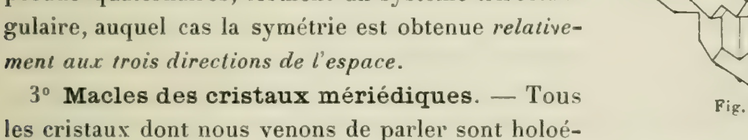


Fig. 351.



pseudo-quaternaires, forment un système trirectangulaire, auquel cas la symétrie est obtenue *relativement aux trois directions de l'espace.*

3° **Macles des cristaux mériédiques.** — Tous les cristaux dont nous venons de parler sont holoédriques. Si de là nous passons aux cristaux hémiédriques, nous les verrons combiner leurs groupements de manière à masquer autant que possible ce qui manque à leur symétrie. C'est le cas de la pyrite, associant, dans la macle de la croix de fer, deux dodécaèdres pentagonaux dont la partie commune restitue exactement le cube pyramidé. C'est aussi le cas du cuivre gris, dont les deux tétraèdres enchevêtrés ont pour partie commune l'octaèdre complet. L'effet de cette macle atteint son maximum dans le diamant, où deux tétraèdres, tronqués par leurs inverses (fig. 352), peuvent arriver à se pénétrer si bien que la macle ne s'aperçoit qu'aux biseaux rentrants, parfois imperceptibles, qui occupent la place des arêtes (fig. 353). De la sorte, non seulement la figure totale est un octaèdre parfait, mais toutes les faces de cet octaèdre, appartenant à des tétraèdres de même signe, sont physiquement identiques. Aussi l'illusion holoédrique est-elle complète. Elle ne l'est pas moins dans le

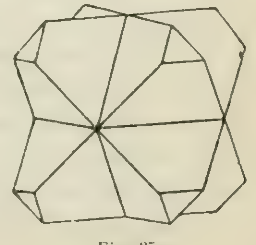


Fig. 352.

cas d'un cristal de quartz en apparence unique et homogène, mais où le microscope dévoile la présence simultanée de parties dextrogyres et de parties lévogyres, comme si, par cette juxtaposition des deux formes possibles de la particule, le cristal avait voulu racheter le défaut de symétrie de celle-ci.

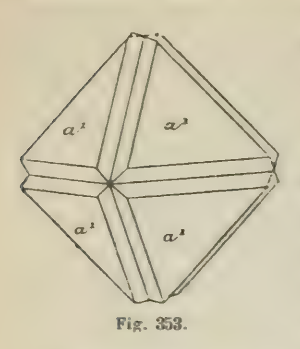


Fig. 353.

La même loi se vérifie dans les macles par accolement des cristaux hémiédriques. L'exemple du cuivre gris et celui de la chalcopyrite nous ont montré que, là où une hémitropie ne suffisait pas pour procurer la symétrie des édifices jumeaux, les particules pivotaient autour d'un axe binaire déficient et qu'alors le plan de jonction devenait un plan de symétrie pour l'ensemble des deux cristaux.

Raison physique du phénomène. — Nous n'avons pas craint de multiplier les exemples, afin de bien montrer la grande généralité de ce phénomène, qu'on peut définir le constant *effort de la matière cristallisée vers la conquête du plus haut degré possible de symétrie*.

Quant à la cause qui détermine cette tendance, elle paraît facile à indiquer. Plus un corps est symétrique et mieux il est protégé contre les agents extérieurs de destruction. S'il y avait, dans sa structure, certaines directions sensiblement différentes des autres, au point de vue de la distribution des particules, il y aurait, par cela même, des parties plus vulnérables. Donc, en se plaçant au seul point de vue de la résistance vis-à-vis de l'extérieur, l'idéal, pour la matière, serait la disposition sphérique. Le moyen, pour un corps cristallisé, de s'en rapprocher le plus possible, est d'adopter un réseau cubique, qui comporte l'identité de constitution suivant trois directions rectangulaires. Et cet arrangement sera surtout efficace, si le cristal affecte la forme ramassée et arrondie d'un rhombododécaèdre, d'un trapézoèdre ou d'un hexoctaèdre. Nous savons que ce sont justement les combinaisons réalisées par le grenat et le diamant. Ce dernier corps surtout est remarquable; car la courbure habituelle de ses faces ajoute encore à l'efficacité de la forme choisie, qui devient extrêmement voisine d'un sphère.

Ainsi la tendance des cristaux vers le maximum de symétrie nous apparaît comme le meilleur moyen d'*assurer aux édifices cristallins le plus haut degré de stabilité*. C'est donc une simple conséquence de ce grand et fécond principe de *la moindre action*, qui semble gouverner toute la philosophie naturelle.

§ 5

NOUVELLES THÉORIES DES GROUPEMENTS

Théories de M. Wallerant. Influence de la particule complexe. — Les conceptions qui viennent d'être exposées en dernier lieu ne s'appliquent

pas exclusivement aux théories de Mallard. Elles ne conviennent pas moins à une autre manière d'expliquer les groupements cristallins, qui est celle de M. Wallerant (1). C'est encore la *symétrie-limite* qui est à la base de cette conception. Mais l'auteur l'envisage d'une façon différente, l'appliquant non au réseau mais à la particule complexe. De plus, il repousse toute distinction entre les macles par accolement et les groupements par pénétration. Cette distinction ne pouvait d'ailleurs être qu'artificielle ; car beaucoup de macles de la première espèce comportent en même temps une pénétration mutuelle des deux cristaux ; et inversement plusieurs des soi-disant pénétrations se limitent respectivement par des faces planes.

L'idée maîtresse de la théorie est la suivante : S'il existe, dans la particule complexe, un élément-limite de symétrie, et que, dans la cristallisation, les particules ne puissent pas adopter toutes l'orientation identique qui en ferait un cristal unique, celles qui s'en écarteront devront tendre, par raison d'équilibre mécanique, à prendre la position qui différera le moins de l'autre, c'est-à-dire celle qui en serait symétrique par rapport à l'élément-limite, considéré comme absolu. De cette façon, un nouveau cristal ou, selon l'ordre de l'élément-limite, de nouveaux cristaux, se formeront à côté du premier, occupant relativement à lui des positions bien déterminées. Ainsi l'élément, axe, plan ou centre, qui faisait défaut comme élément réel à la particule, pourra se trouver rigoureusement réalisé dans le groupement. D'ailleurs, si cet élément existe dans le réseau, c'est-à-dire dans le cas d'une structure mériédrique, les réseaux des divers cristaux engendrés coïncideront entre eux.

Ainsi se trouve étroitement limitée l'aptitude à pouvoir servir d'axe ou de plan de macle. Ce rôle ne peut échoir ni à un plan réticulaire quelconque ni à une rangée arbitrairement choisie. En effet, il faut que la rangée ou le plan puissent s'accommoder des combinaisons auxquelles reste toujours subordonnée, dans un polyèdre, la coexistence de plusieurs éléments de symétrie. C'est ainsi que, depuis longtemps, Bravais a fait remarquer que les plans de macle étaient presque toujours normaux ou parallèles à un axe du cristal.

Si, comme nous l'admettons ici, la cause des groupements réside dans les éléments de symétrie, réels ou limites, de la particule complexe, il y aurait lieu d'examiner successivement : 1° l'influence des éléments réels qui font défaut au réseau (la particule étant un polyèdre, qui n'est pas assujetti aux restrictions pesant sur les réseaux); 2° l'influence des éléments-limites, de l'ordre des éléments réels susceptibles de se rencontrer dans les assemblages parallélépipédiques.

Nous nous occuperons seulement de cette dernière, la seule qui ait été étudiée avec détails.

Groupements parfaits. — Dans cet ordre d'idées, il y a deux catégories de groupements à distinguer :

(1) *Groupements cristallins*. Recueil *Scientia*. 1899.

Dans la première, certains éléments-limites, soit seuls, soit combinés avec les éléments réels du cristal, constituent l'un des groupes de symétrie aptes à se rencontrer dans un même polyèdre réticulaire. Les groupements autour de ces éléments-limites jouiront de cette propriété que, partant de l'un des cristaux composants, et prenant ses symétriques par rapport aux éléments du groupe, on retombera toujours sur l'orientation primitive, quelle que soit la marche suivie dans les opérations. De la sorte, le groupement comprendra un nombre déterminé de cristaux, et on pourra passer de l'un d'eux à un autre quelconque par l'intermédiaire d'un élément de symétrie convenablement choisi dans le groupe.

Ce sont les *groupements parfaits* de M. Wallerant.

Le nombre en est d'ailleurs aisé à prévoir, selon une formule indiquée par M. Michel-Lévy. Soit M_m le nombre des axes d'ordre m que comporte le groupement cristallin. Chaque axe donne lieu, pour une orientation donnée, à $(m - 1)$ symétriques. Appelant Σ la somme des axes de divers ordres, le nombre des symétriques directs sera $1 + \Sigma (m - 1) M_m$, et ce nombre devra être doublé pour tenir compte du centre ou des plans.

Mais si le cristal qui intervient dans le groupement possède lui-même un certain nombre des éléments de symétrie du groupement, plusieurs orientations coïncideront entre elles. Si C est le nombre des axes d'ordre n existant dans le cristal, suivant que ce dernier sera pourvu ou dépourvu de centre, le nombre des orientations susceptibles de se confondre sera

$$2 (1 + \Sigma (n - 1) C_n) \text{ ou } 1 + \Sigma (n - 1) C_n$$

Par conséquent, le nombre total des orientations distinctes dans le groupement s'obtiendra en divisant le polynôme caractéristique du groupement par celui du cristal.

Les groupements parfaits se rencontrent dans les cristaux mériédriques, et principalement dans ceux qui possèdent une mériédrie de symétrie restreinte, puisque, dans ce cas, la particule possède forcément des éléments-limites.

Groupements imparfaits. — Dans la seconde catégorie de groupements, les éléments-limites ne font pas, entre eux ou avec les éléments réels, des angles rigoureusement égaux à ceux des éléments réels d'un groupe de symétrie réticulaire. Dans ce cas, si l'on prend les symétriques du cristal initial par rapport aux différents éléments, au lieu de retomber à coup sûr sur l'orientation primitive, on obtient toujours de nouvelles orientations qui, tout en différant très peu des premières, ne coïncident pas rigoureusement avec elles.

Cependant le nombre des orientations est forcément limité dans la pratique, s'il est illimité en théorie. Ce sont les *groupements imparfaits* de M. Wallerant.

Groupements binaires autour des axes ternaires. — L'observation enseigne qu'un axe ternaire est très souvent un axe de groupement tel que, des deux cristaux groupés, l'un soit orienté, relativement à l'autre, à 60 degrés de

celui-ci. Cela revient à une rotation de 180°, puisque, l'axe étant ternaire, la rotation de 180° — 60° ou 120° ne fait que restituer l'état de choses existant.

Pour expliquer cette propriété, on peut se fonder sur ce que, d'après l'étude de toutes les propriétés physiques des corps cristallisés, on est conduit à admettre que la forme moyenne de leurs particules complexes diffère peu de celle d'une sphère. Dans ce cas, tout axe d'ordre supérieur à 2 peut être considéré comme étant sensiblement un axe de révolution. L'axe ternaire, le seul d'ordre impair, devient ainsi un axe sénaire-limite, pour lequel, dans deux directions à 180 degrés l'une de l'autre, les actions mécaniques seront sensiblement égales. On conçoit donc que cet axe puisse devenir un axe binaire de groupement.

Considérons donc un axe ternaire, réel ou limite, d'une particule complexe, et supposons un cristal, formé de telles particules, assemblées sur les nœuds d'un réseau qui soit réellement ou approximativement terquaternaire ou ternaire.

Les éléments de symétrie des cristaux correspondants seront compris dans l'un des trois groupes suivants

I

Groupes centrés.

1°	$3\Lambda^4$, $4L^3$, $6L^2$, C, 6P, 3Π.
2°	$3\Lambda^2$, $4L^3$, C, 3Π.
3°	L^3, $3L^2$, C, 3P.
4°	L^3, C.

II

Groupes dichosymétriques.

1°	$3\Lambda^2$, $4L^3$, 6P.
2°	L^3, 3P.

III

Groupes hémisymétriques.

1°	$3\Lambda^4$, $4L^3$, $6L^2$.
2°	$3\Lambda^2$, $4L^3$.
3°	L^3, $3L^2$.
4°	L^3.

Nous répétons que ces éléments peuvent être, soit réels, soit limites.

Examinons maintenant les groupements formés par des cristaux de cette catégorie, et tels que les réseaux et les particules complexes de deux cristaux

soient orientés, autour de l'axe ternaire, à 180° l'un de l'autre. Trois cas sont à considérer, correspondant aux trois groupes de symétrie.

Dans les groupes centrés, la particule complexe possédant un centre, il en sera de même pour les deux cristaux du groupement. Tous deux ensemble auront donc un plan de symétrie normal à l'axe ternaire; on peut l'appeler Π′.

En outre, dans les trois premiers groupes de la catégorie I, où il y a déjà trois plans de symétrie passant par l'axe ternaire, la symétrie quasi-sénaire de ce dernier entraîne la présence de trois autres plans, faisant avec les premiers des angles de 30°. Dans le réseau terquaternaire, il est facile de voir que ces plans seront de notation a^2 (112), puisque la normale à a^2 est bissectrice de l'angle formé par deux normales aux faces adjacentes de b^1, inclinées à 60° l'une de l'autre, ce qui fait que l'angle de b^1 avec a^2 est exactement de 30°. Dans le réseau ternaire ou rhomboédrique, les plans à 30° des plans de symétrie sont ceux du prisme e^2 ou (112).

De même, la présence du centre entraîne l'existence de trois nouveaux axes binaires perpendiculaires à ces plans a^2 ou e^2.

En résumé, la formule de symétrie du groupement devient

$$L^{2\times3},\ 3L^2,\ 3L'^2,\ C,\ 3P',\ 3P,\ \Pi'.$$

Par conséquent, la symétrie des deux cristaux groupés sera réalisée *à la fois* par rapport à un des plans P′, à un des axes L′, au plan Π, à l'axe ternaire considéré comme binaire ou au centre. Mais *a priori* il n'existe aucune raison pour qu'un de ces éléments intervienne de préférence aux autres. Tout ce qu'on a le droit de dire, c'est que, suivant la forme de la surface d'accolement, tel ou tel de ces éléments sera mieux mis en évidence que les autres dans la *forme extérieure* du groupement.

En revanche, s'il s'agit de cristaux ne possédant que L^3 et C, les seuls éléments que le groupement mettra en évidence seront

$$L^{2\times3},\ C,\ \Pi.$$

Exemples du mode de groupement. — Dans le système cubique, si les faces de l'octaèdre a^1 sont de formation facile, comme cette face correspond justement au plan Π′, devenu plan de symétrie, la forme extérieure mettra cet élément en évidence. C'est le cas de la macle classique des *spinelles* (fig. 318).

Dans un autre cas, c'est l'axe ternaire qui se trouvera mis en évidence par la pénétration mutuelle de deux cubes, accolés de manière à posséder en commun une diagonale, ou du moins une ligne parallèle à l'axe ternaire. C'est la macle de la fluorine (fig. 350), qu'il n'y a nullement lieu de distinguer de la précédente.

Avec des cristaux hémiédriques, dépourvus de centre, comme ceux de blende (fig. 337), le même groupement suivant a^1, plan de symétrie de la macle, donnera deux cristaux *géométriquement* mais non *physiquement* symétriques,

une face du tétraèdre droit correspondant à une face du tétraèdre gauche. Le cuivre gris donne tantôt deux tétraèdres se pénétrant de manière à avoir un axe ternaire commun, tantôt, comme dans la figure 339, deux tétraèdres accolés suivant un des nouveaux plans de symétrie a^2; de sorte que la symétrie est réalisée, à la fois pour l'axe ternaire par rotation de 180°, et pour le plan a^2.

Un exemple de macle de cristaux hémisymétriques est fourni par le cinabre, où deux cristaux se groupent symétriquement par rapport aux plans a^1 et e^2.

Exemples de groupements parfaits. — Comme exemples de groupements terquaternaires parfaits nous prendrons le cas d'une particule complexe possédant $3A^2$, $4L^3$, C, 3II, qui, selon la formule indiquée, devra donner lieu à $\frac{48}{24} = 2$ cristaux, séparés l'un de l'autre par les 6 plans de symétrie déficients. Ces deux cristaux se subdiviseront en 12 pyramides, ayant leur sommet commun au centre et ayant pour bases les triangles dessinés sur les faces du cube par les diagonales. C'est la macle de deux cubes de pyrite de fer, chacun d'eux se distinguant par l'orientation spéciale des stries; c'est aussi la macle de deux dodécaèdres pentagonaux, dite de la croix de fer (fig. 342).

La combinaison $3A^2$, $4L^3$ engendrerait $\frac{24}{12} = 2$ cristaux, respectivement constitués par des particules complexes inverses les unes des autres. C'est le cas réalisé par deux tétraèdres, l'un gauche, l'autre droit, de chlorate de soude, se croisant comme les tétraèdres de la figure 343, divisés chacun en quatre pyramides par les plans II.

La boracite se présente en cristaux cubiques tétartoédriques, offrant les faces p, b^1, a^1 et a^2. Les angles que ces faces font entre elles sont rigoureusement ceux qui conviennent à la symétrie cubique; de sorte que le réseau ne peut être que terquaternaire.

Cependant les phénomènes optiques font ressortir deux types de structure :

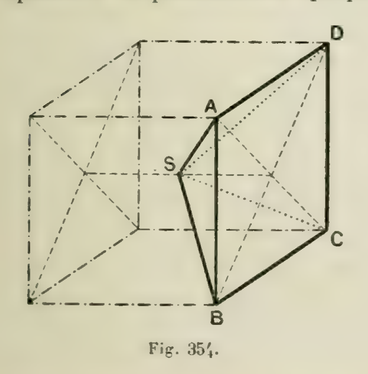


Fig. 354.

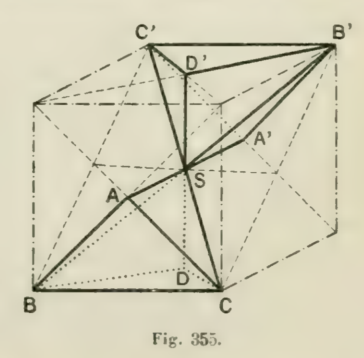


Fig. 355.

l'un qui comporte douze pyramides biaxes, groupées autour du centre, avec les faces du rhombododécaèdre comme bases, et la bissectrice aiguë des axes optiques normale à ces bases. Le second type se compose aussi de six pyramides

issues du centre et dont chacune, telle que SABCD, s'appuie sur une face du cube (fig. 354); ou bien encore chacun des six cristaux composants est constitué (fig. 355) par deux parties, symétriques l'une de l'autre relativement au centre S : l'une, SABCD, comprenant comme bases les deux quarts de faces cubiques ABC, BCD; l'autre, SA'B'C'D', appuyée sur les quarts de face A'B'C', B'C'D'.

Dans ces deux types, la symétrie réelle se réduit à Λ^2, 2P et les macles ont pour éléments de symétrie $3\Lambda^2, 4L^3, 6P$. L'application de la formule des groupements parfaits indique en effet $\frac{24}{4} = 6$ cristaux.

Exemples de groupements imparfaits. — Un type de groupements imparfaits est celui de la Staurotide, dont les macles reçoivent de M. Wallerant une explication à peu près identique avec celle de Mallard, sinon que le premier indique la macle en croix latine (fig. 345) comme symétrique à la fois relativement à l'axe quaternaire limite, normal à h^1, et à une face d'accolement qui correspondrait à la face p du cube, tandis que la macle en croix de Saint-André (fig. 346) orienterait les cristaux à 60°, c'est-à-dire à 180°, autour d'un axe ternaire-limite.

Les feldspaths fournissent d'autres exemples instructifs de groupements imparfaits.

Les faces fondamentales de l'orthose font entre elles les angles suivants : $pg^1 = 90°$; $e_{\frac{1}{2}}\,g^1 = 45°3'$; $e_{\frac{1}{2}}\,p = 44°57'$.

Donc la particule complexe de l'orthose possède : un axe quaternaire-limite pg^1; un plan de symétrie réel g^1; un axe binaire réel ph^1; des plans-limites p, $e_{\frac{1}{2}}$, $e_{\frac{1}{2}}$. D'autre part, l'angle mg^1 étant de 120°36', $h^1\,g^1$ est un axe ternaire-limite et, g^1 étant réel, les faces m deviennent des plans-limites. Cette particule est donc une particule cubique déformée et il en est de même, à un moindre degré, des particules des feldspaths tricliniques, où g^1 n'est plus qu'un plan-limite et ph^1 qu'un axe binaire-limite.

Cela posé, on peut prévoir que les groupements symétriques pour les feldspaths se produiront autour des plans p, m, $e_{\frac{1}{2}}$, h^1, g^2 (ces derniers complétant la série de six plans se coupant suivant l'axe sénaire-limite h^1g^1); puis $b_{\frac{1}{2}}$ et $a_{\frac{1}{2}}$; qu'en outre les axes binaires de groupements seront h^1g^1, ph^1, pg^1, pm, pg^1 pouvant en outre fonctionner comme axe quaternaire et h^1g^1 comme axe ternaire.

De fait, la combinaison p est réalisée dans la macle de Manebach (fig. 328), le groupement g^1 est celui de l'albite (fig. 332), $e_{\frac{1}{2}}$ est la macle de Baveno, h^1 celle de Roc Tourné, pendant que la macle de Carlsbad (fig. 329) réalise la combinaison h^1g^1 et celle du péricline ph^1. En outre, pg^1 intervient dans la macle de l'Esterel et $b_{\frac{1}{2}}$ a été également observé.

Si, partant des paramètres de l'orthose, on cherche ce que doivent devenir les caractéristiques des faces relativement aux trois axes quaternaires d'un

cristal ayant pour axe ternaire pg^1 et pour axe quaternaire h^1g^1, on trouve (1) que les faces p, g^1, m, correspondent aux plans b^1 du cube; les faces $e\frac{1}{2}$ aux faces cubiques p; h^1, g^2, $b\frac{1}{2}$ représentent les faces a^2, et les plans $a\frac{1}{2}$ représentent les plans a^1 du cube.

Théories diverses. — Très différente de la théorie de M. Wallerant est celle de M. Georges Friedel (2) qui, rejetant complètement la considération des particules complexes, fait intervenir, comme Mallard, la pseudo-symétrie *du réseau*, mais en admettant les plans au même titre que les axes, de sorte que la loi des macles serait la suivante : « Les plans et axes d'ordre n de pseudo-symétrie du réseau simple (plans réticulaires et rangées) peuvent jouer le rôle de plans de macle et d'axes de macle d'ordre n ». Le parallélisme des réseaux des cristaux groupés serait tantôt parfait (mériédrie), tantôt approché (pseudo-mériédrie).

Le même auteur distingue sous le nom de « macles par mériédrie réticulaire » celles qui obéissent à la condition suivante : Le plan de macle, sans être plan de symétrie du réseau, est exactement normal à une rangée; ou bien l'axe de macle, sans être axe de symétrie du réseau, est exactement normal à un plan réticulaire.

Enfin la rubrique « macles par pseudomériédrie réticulaire » abriterait les groupements où, dans l'énoncé précédent, les mots de « symétrie » et de « normal » devraient être remplacés par ceux de « pseudo-symétrie » et de « pseudo-normal » (3).

Quand on étudie les diverses théories proposées pour l'explication des macles, on ne peut manquer d'être frappé d'un fait : c'est que, malgré des points de départ souvent très différents, les auteurs rendent compte, presque avec la même facilité, des faits observés, ce qui semble attester la malléabilité un peu déconcertante des constantes cristallographiques. On pourrait donc être fort embarrassé pour faire un choix entre ces théories et se borner à reconnaître, une fois de plus, qu'il y a bien des manières de justifier rationnellement un ensemble de faits.

Cependant cela ne veut pas dire que toutes ces manières se valent, et nous nous croyons le droit de préférer celles qui, groupant le plus grand nombre possible de faits, les encadrent sous les formules les plus claires. D'autre part, si quelques-uns considèrent comme un mérite d'introduire dans les explications le minimum d'hypothèses, d'autres (et nous sommes de ceux-là) préfèrent acheter plus de clarté au prix d'une moindre réserve. C'est pour cela que nous nous sommes plu à exposer avec prédilection les théories qui visaient à *figurer* le plus nettement possible ce que peut être la structure des corps cristallisés,

(1) Wallerant, *Groupements cristallins*, p. 63.
(2) *Étude sur les groupements cristallins*, Saint-Étienne, 1904.
(3) Il convient de rappeler que, pour M. Friedel, un cristal est *mérièdre* quand sa symétrie est inférieure à la symétrie *réelle* de son réseau, et *pseudomérièdre* quand elle est inférieure à la symétrie *approchée* du réseau.

surtout celles où il est fait effort pour rattacher les effets observés à une cause. Il ne nous semble pas qu'on puisse se désintéresser du motif qui rive si étroitement chaque substance à un mode déterminé de cristallisation. Pour cette raison, on a donné ici la préférence aux doctrines qui cherchent, dans la forme des particules cristallines, aussi bien la cause des groupements que celle du choix du système réticulaire. Cette conception nous paraît, non seulement aussi légitime, mais aussi nécessaire que peut être, pour les chimistes, celle des molécules et, pour les physiciens, la notion nouvelle, si suggestive et déjà si féconde, des électrons.

D'autre part, les diverses théories s'appuient toutes sur la symétrie limite, et doivent également s'incliner devant ce fait d'expérience, que les groupements sont d'autant plus fréquents que la symétrie propre des éléments composants est plus défectueuse. C'est donc la confirmation de la tendance naturelle des corps cristallisés vers l'acquisition d'une symétrie supérieure, destinée à leur assurer une meilleure stabilité.

Groupements entre espèces différentes. — L'expérience prouve que souvent des cristaux d'espèces différentes, entre lesquelles il n'existe aucune analogie chimique, peuvent s'orienter les uns sur les autres d'une façon bien déterminée.

D'après M. Wallerant (1), une même loi préside à toutes ces associations. Si l'on considère tout corps cristallisé comme dérivant d'un corps cubique, par une déformation qui change les éléments de symétrie en éléments diamétraux, on peut dire que les cristaux s'orientent de telle sorte que deux éléments au moins de la forme primitive parallélépipédique de l'un coïncident avec deux éléments de la forme primitive de l'autre. Avec cette orientation, suivant deux directions au moins, les forces exercées par les particules de l'un sur celles de l'autre deviennent des forces centrales.

Quand les formes primitives sont sensiblement égales, si en outre les éléments coïncidants sont de même espèce, les deux réseaux sont sensiblement parallèles. C'est le cas des cristaux de cuivre gris, englobés dans des cristaux de blende, avec parallélisme des faces a^1; c'est aussi celui de deux tétraèdres orientés à 90°, l'un de cuivre gris, l'autre de chalcopyrite; ou des cubes de cobaltine portant de petits cristaux de chalcopyrite avec parallélisme des axes quaternaires et des plans de symétrie. La même combinaison est réalisée par des cristaux de rutile, qui s'implantent sur des cristaux d'oligiste, avec coïncidence des faces p du rutile avec a^1 de l'oligiste, l'axe vertical du premier étant parallèle à l'arête a^1p du second; ou par les cristaux de xénotime, associés à ceux de zircon avec parallélisme des axes. De même, on voit fréquemment des cristaux de disthène recouverts d'une enveloppe de staurotide, accusant la coïncidence presque absolue des deux réseaux, et les feldspaths d'espèce diffé-

(1) *Bull. soc. minér.*, nov. 1902.

rente, par exemple orthose et albite, se groupent de façon à faire coïncider à peu près les faces g^1, h^1 et p.

Dans des combinaisons moins parfaites, on voit une arête de la forme primitive d'un cristal coïncider avec une diagonale de l'autre (pyrite et galène) ou avec une diagonale d'une face (calcite et quartz, quartz et feldspaths), etc.

M. Wallerant a fait la remarque que, dans les groupements de cristaux d'espèces différentes, les axes *trapézoédriques*, c'est-à-dire les rangées de notation (112) (qui, dans le système cubique, sont normales sur les faces du trapézoèdre) jouissent de propriétés communes avec les éléments réels de symétrie.

§ 6

MACLES ARTIFICIELLES

Production de macles secondaires. — Quelque ingénieuse que puisse être une théorie des macles, le principal mérite qu'on doive lui demander est d'être d'accord avec l'expérience, quand celle-ci est réalisable. Or, s'il existe un grand nombre de macles qu'on n'a pas encore réussi à reproduire (macles *primordiales* des cristallographes), en revanche il y a toute une catégorie de groupements (macles artificielles ou *secondaires*) qu'on réalise, soit par des actions mécaniques, soit par l'intervention de la chaleur sur certains cristaux. Il importe de voir comment on en peut rendre compte.

La plus remarquable des macles par actions mécaniques est celle qui se produit pour la calcite dans l'expérience déjà citée de M. Baumhauer (fig. 335, page 327). Tous les éléments de la partie déplacée du cristal ont subi une translation parallèle au plan de séparation ou plan de glissement b^1, et proportionnelle à leur distance à ce plan.

Lois des déformations. — L'étude géométrique des translations proportionnelles (1) montre qu'il y a lieu de distinguer : 1° le *plan de glissement*; 2° le plan perpendiculaire au premier et parallèle à la translation, qui est le *plan de symétrie de la déformation*, la droite d'intersection des plans étant l'*arête de glissement*. Si la translation d'un point, situé à l'unité de distance du plan de glissement, est égale à K, il est aisé de reconnaître que les deux plans, normaux au plan de symétrie, et faisant de part et d'autre avec la direction négative du glissement, des angles α tels que $\cot \alpha = \frac{K}{2}$, sont amenés par la déformation dans une position symétrique, à la fois par rapport au plan de glissement et à la normale à ce plan. On peut donc les appeler *plans de nulle déformation*. Leurs intersections avec le plan de symétrie jouissent du même privilège et peuvent s'appeler *rangées principales*.

(1) Voir Wallerant, *Bull. soc. minér.*, juillet 1904.

Dans l'expérience de Baumhauer, le plan de glissement étant b^1, l'arête de glissement est une parallèle à une arête b, les plans de nulle déformation sont de notation p et les lignes conjuguées ou rangées principales sont les diagonales de ces faces p divergeant du sommet ternaire.

On démontre (1) que pour qu'une translation proportionnelle transforme un polyèdre en son symétrique, soit relativement au plan de glissement, soit relativement à l'arête de glissement, il faut et il suffit que le plan et l'arête soient respectivement un plan diamétral ou un diamètre du polyèdre; et, dans ce dernier cas, le plan de nulle déformation est conjugué du diamètre en question. En outre, pour qu'après cette translation les particules complexes soient devenues symétriques, il faut que le plan et l'arête de glissement leur appartiennent aussi en qualité d'éléments diamétraux.

Avec la calcite ces conditions sont remplies, b^1 étant un plan diamétral du rhomboèdre dont b est une arête, c'est-à-dire aussi un élément diamétral.

Macles artificielles diverses. — Il se produit aussi des macles mécaniques sans glissement, dans les cas où le plan diamétral de macle est un élément de symétrie du réseau, auquel cas ce réseau est à lui-même son symétrique. Alors le macle ne résultera plus que de la déformation de la particule complexe, à laquelle cet élément faisait défaut; celle-ci, pouvant être amenée par l'action mécanique à une orientation différant moins de la position symétrique que l'orientation primitive, pourra venir d'elle-même, une fois l'action terminée, se placer dans l'orientation symétrique, qui est une position d'équilibre, et la macle sera produite.

C'est le cas de la boracite qui, bien qu'adoptant un réseau terquaternaire, ne possède en réalité, comme l'indiquent les phénomènes optiques, qu'un axe binaire Λ^2, coïncidant avec un axe quaternaire du réseau, et deux plans de symétrie 2P, en coïncidence avec deux plans de symétrie non principaux de l'assemblage. Or si, sur une lame de boracite taillée normalement à un axe ternaire du réseau, on appuie la pointe d'une aiguille, on fait naître avec la plus grande facilité des lamelles symétriques par rapport aux autres plans non principaux, et cela sans produire aucune déformation extérieure. La même chose s'observe avec un composé de chlorhydrate d'ammoniaque et de bromure de nickel.

On peut aussi produire des macles mécaniques sans glissement sur les acétates triples qui contiennent, en combinaison avec la soude et l'urane, un des métaux suivants : cuivre, cobalt, nickel, zinc; ces cristaux sont rhomboédriques; mais les plans de symétrie du réseau passant par l'axe ternaire font défaut au cristal.

La particule de l'édifice obtenu par action mécanique devant être symétrique de celle de l'édifice primitif, le phénomène des macles de ce genre ne peut

(1) Voir Wallerant, *Groupements cristallins.*

s'observer que chez les cristaux qui possèdent un centre ou un plan de symétrie. D'autre part, une particule complexe cubique holoédrique ne pouvant avoir d'élément diamétral, on s'explique qu'un corps rigoureusement cubique ne puisse pas être maclé par actions mécaniques. L'observation enseigne aussi que les macles relativement aux plans ou rangées (111), (112), ne peuvent être obtenues mécaniquement ; ce qui se conçoit, les éléments en question ne pouvant être diamétraux (1).

§ 7

GÉNÉRALITÉ DE LA SYMÉTRIE QUASI-CUBIQUE

Limites cubiques des divers genres de symétrie. — Un point sur lequel les auteurs des diverses théories des groupements s'accordent, c'est pour reconnaître la grande généralité de la symétrie quasi-cubique. Nul ne l'a mieux mise en lumière que Mallard, à la suite de ses recherches sur les azotates et les chlorates, qui peuvent cristalliser ensemble en toutes proportions, bien qu'au premier abord ils paraissent appartenir à des systèmes cristallins incompatibles (2). La discussion approfondie des rapports paramétriques l'a conduit à cet égard à des conclusions très suggestives, dont nous allons donner un court aperçu.

On sait que, dans le réseau cubique simple, les paramètres des axes quaternaires, ternaires et binaires sont respectivement $1, \sqrt{3}$ et $\sqrt{2}$, c'est-à-dire $1 : 1,732 : 1,414$. Nous connaissons aussi les coefficients par lesquels deux de ces valeurs doivent être multipliées, si l'on veut passer du réseau cubique simple au réseau centré ou à celui à faces centrées.

Bornons-nous au premier cas. Nous remarquerons que, si le système le plus simple consiste à prendre les axes quaternaires pour axes conjugués, on peut aussi procéder de plusieurs autres manières, dont chacune a l'avantage de permettre la comparaison du système cubique avec l'un des autres systèmes dont il serait la limite. On peut d'abord choisir pour axe vertical un axe quaternaire et pour axes horizontaux les deux axes binaires qui lui sont perpendiculaires. On aura ainsi *la limite cubique de la symétrie quadratique*. Désignant la solution précédente par (I), celle-ci par (II), nous obtenons, pour le rapport des axes :

$$1 : 1,414 : 1,414,$$

ou, prenant pour unité la longueur des axes binaires, afin de nous conformer à la notation quadratique usuelle, et plaçant l'axe vertical à la fin

$$(II) = 1 : 1 : 0,707,$$

(1) Wallerant, *Bull. soc. minér.*, juillet 1904.
(2) Mallard, *Bull. soc. minér.*, VII (1884), p. 349.

soit, pour abréger :

$$(II) = 1 : 0,707.$$

Cherchons maintenant *la limite cubique de la symétrie rhomboédrique.* Il faudra prendre, pour axe vertical, un axe ternaire. Mais, dans cette solution (III), nous pouvons prendre, pour axes horizontaux, soit (III, 1) les trois axes binaires normaux à l'axe ternaire choisi ; soit (III, 2) les bissectrices des angles formés par ces axes binaires.

Le premier choix donne, en mettant l'axe ternaire à la fin :

$$(III, 1) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 1 : 1,225.$$

Avec le second choix, les axes horizontaux étant les grandes diagonales d'un rhombe de 120°, dont le côté est égal à $\sqrt{2}$, leurs paramètres sont égaux à $\sqrt{6}$.

On a donc

$$(III, 2) = \frac{\sqrt{6}}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2}}{1} = 1 : 0,707.$$

Enfin, pour réaliser *la limite cubique de la symétrie rhombique*, on peut prendre, comme axe vertical, un axe ternaire et, pour axes horizontaux, un axe binaire et la rangée qui lui est perpendiculaire, c'est-à-dire une des lignes $\sqrt{6}$. On a donc la solution

$$(IV) = \sqrt{3} : \sqrt{2} : \sqrt{6}.$$

Et cette solution est susceptible de trois variétés, suivant celui des trois axes qu'on prend pour déterminer l'unité.

Choisissons d'abord l'axe $\sqrt{6}$, nous aurons

$$(IV, 1) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{6}} : 1 : \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{6}}$$
$$= 0,577 : 1 : 0,707.$$

Prenons ensuite l'axe $\sqrt{2}$, nous aurons

$$(IV, 2) = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} : 1 : \frac{\sqrt{6}}{\sqrt{2}}$$
$$= 1,225 : 1 : 1,732$$

Enfin, le choix de $\sqrt{3}$ pour unité donne

$$(IV, 3) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} : 1 : \frac{\sqrt{6}}{\sqrt{3}}$$
$$= 0,816 : 1 : 1,414$$

GENRE DE SYMÉTRIE LIMITE	SOLUTIONS	RAPPORTS D'AXES
Symétrie cubique absolue	I	1 : 1 : 1
» quadratique	II	1 : 0,707
» rhomboédrique.	III,1	1 : 1,225
» »	III,2	1 : 0,707
» rhombique.	IV,1	0,577 : 1 : 0,707
» »	IV,2	1,225 : 1 : 1,732
» »	IV,3	0,816 : 1 : 1,414

Applications diverses. — Il suffira donc désormais, pour vérifier si un corps est pseudo-cubique, de s'assurer que son rapport d'axes cristallographiques peut être identifié avec l'une des formules qui viennent d'être établies.

Parfois cette vérification sera immédiate. Ainsi le rapport d'axes de l'azotate de potasse rhombique, 0,591 : 0 : 0,701, est très voisin de la formule (IV, 1), qui est 0,577 : 1 : 0,707. L'azotate double d'argent et de potasse a ses trois paramètres presque égaux (1,04 : 1 : 1) et l'angle ph^1 de ce corps triclinique est 88°45′, c'est-à-dire très voisin de 90 degrés.

D'autres fois, pour mettre le fait en évidence, on devra multiplier par un coefficient très simple la valeur d'un ou de deux paramètres. Par exemple, l'azotate d'ammoniaque rhombique ayant pour rapport d'axes (1,16 : 1 : 1,10), on a

$$1{,}15 = 2 \times 0{,}577, \qquad 1{,}06 = \frac{3}{2} \times 0{,}707;$$

on ramène ce rapport, à peu de chose près, à la formule (IV, 1), en divisant le premier paramètre par 2 et le second par $\frac{3}{2}$. L'azotate d'argent a pour rapport (0,73 : 1 : 0,69). Ce rapport diffère peu de (0,707 : 1 : 0,707), valeur qu'on déduit de la formule cubique (1 : 1,414 : 1,414), en divisant 1,414 par 2. Le bromate de potasse (isomorphe avec l'iodate cubique de la même substance) est rhomboédrique avec R.A. = 1 : 1,35. Ce rapport diffère peu de 1 : 1,41, valeur qu'on obtient à l'aide de la formule (III, 2), en multipliant le second terme par 2. Enfin pour l'azotate quadratique d'argent, le paramètre 0,93 de l'axe quaternaire est très voisin de 0,944, nombre qui représente les $\frac{4}{3}$ de la valeur de l'axe vertical d'un réseau cubique, rapporté à un axe quaternaire et à deux axes binaires (II).

Ces remarques ne s'appliquent pas seulement aux oxysels dont il vient d'être question. On peut en faire d'analogues (1) pour la série des carbonates, celle des titanates, pour les oxydes, les sulfures, les sulfosels, les corps simples, les sulfates, même les silicates, en particulier pour les silicates hydratés de la

(1) Voir les chiffres à l'appui dans le mémoire cité de Mallard.

famille des zéolites, dont les paramètres se ramènent avec une grande facilité à ceux du cube.

Généralité du réseau quasi-cubique. — De là résulte ce fait remarquable que, pour une foule de substances, probablement même pour toutes les substances, *les paramètres cristallographiques peuvent être ramenés à ceux du réseau cubique, sous la seule condition d'être préalablement divisés par des coefficients, qui tous sont compris parmi les rapports des quatre nombres simples* 1, 2, 3, 4.

A la vérité, ce résultat pourra perdre de son importance, si l'on considère que, les paramètres étant le plus souvent représentés par des nombres compris entre 1 et 4, leur multiplication par les rapports des quatre premiers nombres donnera toujours un résultat voisin de ce qui convient à la loi indiquée.

Cependant l'hypothèse que tous les corps ont un réseau quasi-cubique a l'avantage d'être la plus simple qu'on puisse faire relativement à la constitution de la matière cristallisée; car si, autour du centre de gravité de chaque molécule, on imagine une sphère en rapport avec l'énergie de son action propre, on conçoit que toutes ces sphères aient une tendance à s'empiler de manière à occuper le *minimum d'espace*. Or cet arrangement, qui est celui des piles de boulets, se résume dans la juxtaposition d'une série d'octaèdres réguliers, c'est-à-dire dans la formation d'un système réticulaire cubique à faces centrées (mode cubique octaédral).

En dehors de sa simplicité, l'hypothèse possède un autre mérite. Nous savons que, pour tous les cristaux, les propriétés physiques peuvent être géométriquement représentées par des ellipsoïdes. Or l'expérience démontre que tous ces ellipsoïdes sont très voisins de la forme sphérique, les différences entre les axes extrêmes n'étant que rarement supérieures à *un dixième*. De plus, suivant une remarque de M. Dufet, si l'on comprime dans une seule direction un corps isotrope, tel qu'un cristal de sel gemme, ce qui modifie la forme de sa surface de conductibilité, par exemple, on observe que la différence qui s'introduit entre la forme de cette surface et celle d'une sphère est proportionnelle à la pression exercée, c'est-à-dire au rapprochement opéré entre les molécules suivant la direction de la pression. Or cette différence est *du même ordre de grandeur* que celle qu'on observe entre la sphère et l'ellipsoïde thermique de l'idocrase, substance quadratique, ou de tel autre corps qu'on voudra. Comme d'ailleurs la pression exercée sur le cube de sel gemme n'a pu modifier que de quantités extrêmement petites les distances, primitivement égales, qui séparaient les particules, il semble naturel d'en conclure que, dans les cristaux, les différences qui existent, suivant les diverses directions de l'espace, entre les distances interparticulaires, doivent être du même ordre que celles qui s'introduisent dans un cristal cubique comprimé unilatéralement; ce qui revient à dire que tous les réseaux cristallins sont à peu près cubiques (1).

(1) Mallard, *op. cit.*, p. 392.

Possibilité de particules diversement orientées. — Mais ici se présente une objection en apparence très grave. Dans l'idocrase, on admet que le paramètre de l'axe quaternaire est 0,537, c'est-à-dire que, suivant cet axe, les particules sont presque *deux fois plus rapprochées* que suivant la direction perpendiculaire. Ce fait semble inconciliable avec la remarque précédente; comme aussi il paraît impossible, à première vue, de mettre d'accord la forme cubique des réseaux avec les différences, souvent très grandes, que présentent entre eux les paramètres cristallographiques, tels que l'observation permet de les établir.

Cependant cette antinomie, si sérieuse qu'elle paraisse, semble pouvoir être résolue si, avec Mallard, on distingue le réseau *des centres de gravité particulaires* de celui qui convient seulement aux *particules de même orientation*.

On se rappelle en effet que le principe fondamental de la cristallographie rationnelle consiste à admettre l'existence d'une infinité de *points homologues*, c'est-à-dire caractérisés par une égale distribution de la matière autour de chacun d'eux. Or s'il peut arriver que tous les centres de gravité particulaires soient des points homologues, cela n'est pas nécessaire et il est permis de croire qu'il n'en est pas ainsi dans la plupart des cas. Bien des phénomènes, tels que la polarisation rotatoire et le changement des systèmes cristallins avec la température, peuvent s'expliquer par la production de modifications périodiques dans l'orientation des particules, et les expériences des macles artificielles attestent la réalité de ces mouvements. Dès lors, il est aisé d'admettre que tous les centres de gravité particulaires, sans exception, étant rangés sur les nœuds d'un assemblage cubique ou quasi-cubique, qui suffit à déterminer les propriétés physiques du corps, les *particules de même orientation*, considérées seules, forment un autre réseau, assujetti seulement à cette condition, que ses paramètres aient des rapports simples avec ceux du système cubique. Et c'est la symétrie de ce second réseau qui gouvernera les propriétés *morphologiques*, c'est-à-dire la forme extérieure, les clivages, les hémitropies, etc.

Cette notion peut d'ailleurs recevoir, comme l'a remarqué Mallard, une interprétation chimique. Concevons que, le long d'une rangée, les particules se suivent en affectant successivement trois orientations distinctes, que nous désignerons par 1, 2, 3. L'ensemble de ces trois particules formera une *particule multiple*, qui pourra être considérée comme caractérisant le corps en question, et ce corps sera ce qu'on appellerait en chimie un composé *polymère*. Il différera, par plusieurs de ses propriétés, du corps que formeraient les mêmes particules, si elles avaient toutes la même orientation. Sa production sera accompagnée d'une absorption ou d'un dégagement de chaleur latente, représentant l'équivalent du travail mécanique accompli par les particules dans leur rotation autour des centres de gravité. Enfin ce groupement pourra n'être stable qu'entres certaines limites de température.

Déformation des réseaux. — D'après ce qui vient d'être dit, on conçoit

qu'on ait pu être amené à considérer tous les réseaux comme susceptibles de dériver par une petite déformation du réseau cubique. Tandis que, dans ce dernier, toutes les faces et tous les plans diagonaux sont des plans de symétrie, toutes les arêtes et leurs diagonales étant des axes de symétrie d'ordre pair, dans un parallélépipède quelconque, les mêmes éléments ne sont plus que *diamétraux*, les faces du parallélépipède étant conjuguées de ses arêtes, tandis que les diagonales des faces sont conjuguées des plans diagonaux. Plus la symétrie est voisine de ce qui convient au cube, et mieux chaque plan diamétral s'approche d'être perpendiculaire à l'arête diamétrale qui lui est conjuguée.

Dailleurs il y a des cas où la déformation réelle d'un parallélépipède peut être matériellement réalisée sans rupture. Ainsi M. Mügge a obtenu non seulement la déformation, mais la transformation complète d'un rhomboèdre de calcite par compression entre les deux mâchoires d'une pince, l'effort s'exerçant sur deux sommets e diamétralement opposés. Le rhomboèdre s'aplatit, les deux sommets e deviennent des sommets culminants a et réciproquement. Le rhombrèdre se transforme en un autre identique, mais symétrique du premier par rapport au plan b^1, parallèle aux arêtes b aboutissant aux sommets e comprimés. Les faces p ne changent pas de notation; mais a^1 se transforme en e^1.

CHAPITRE IV

ISOMORPHISME, POLYMORPHISME

§ 1

NOTION DE L'ISOMORPHISME

Définition de l'isomorphisme. — L'étude des macles nous a fait connaître les groupements qui peuvent se faire entre cristaux de même espèce. Avec l'*isomorphisme*, nous allons pénétrer dans la connaissance des associations intimes qui sont susceptibles de se former entre particules cristallines d'espèce différente.

Sous le nom d'*isomorphisme*, Mitscherlich a désigné la propriété en vertu de laquelle des substances, *de composition chimique semblable et de même forme cristalline*, peuvent cristalliser ensemble *en toutes proportions*, de sorte que les corps résultants sont affranchis de la loi des proportions définies.

L'isomorphisme, ainsi compris, renferme deux notions distinctes : 1° celle de l'identité de forme des corps de même composition chimique; 2° celle de la faculté que possèdent ces corps, au moins quand ils ont même fusibilité ou même solubilité, de former des *mélanges isomorphes*, c'est-à-dire des composés définis, cristallisables, dans lesquels les quantités relatives des composants peuvent varier en toutes proportions.

Séries isomorphes. — La première notion s'appuie, en minéralogie, sur un grand nombre de faits, dont voici les principaux :

Il existe une série de carbonates, répondant à la formule RCO^3, qui tous cristallisent en prismes rhombiques, d'angles presque identiques et possédant à peu de chose près les mêmes clivages. Le tableau suivant les fait connaître :

ESPÈCES	COMPOSITION	ANGLE *mm*
Aragonite.	$CaCO^3$	116°10′
Strontianite	$SrCO^3$	117°19′
Cérusite.	$PbCO^3$	117°14′
Withérite.	$BaCO^3$	117°48′

Une autre série, encore plus riche, est celle des carbonates rhomboédriques. Ils ont la même formule chimique générale que les précédents, mais cristallisent en rhomboèdres presque identiques, ont tous leurs clivages faciles parallèles à *p* et sont optiquement négatifs. Ce sont :

ESPÈCES	COMPOSITION	ANGLE *pp*
Calcite	$CaCO^3$	105°5′
Dolomie.	$CaMgC^2O^6$	106°15′
Dialogite	$MnCO^3$	106°51′
Sidérose.	$FeCO^3$	107°
Giobertite.	$MgCO^3$	107°20′
Smithsonite	$ZnCO^3$	107°40′

De même la série des *Spinelles*, minéraux de formule générale RO, R^2O^3 ou RR'^2O^4, est remarquable par sa cristallisation en octaèdres et par l'analogie de ses groupements cristallins les plus habituels. Cette série comprend le Spinelle proprement dit $MgAl^2O^4$, la Hercynite $FeAl^2O^4$, la Gahnite $ZnAl^2O^4$, la Chromite $FeCr^2O^4$, la Magnétite $FeFe^2O^4$, etc.

Citons ensuite une série de corps hexagonaux offrant l'hémiédrie pyramidale et qui comprend : l'Apatite riche en chlore $Ca^5P^3O^{12}Cl$, l'Apatite fluorée $Ca^5P^3O^{12}Fl$, la Pyromorphite $Pb^5P^3O^{12}Cl$, le Mimétèse $Pb^5As^3O^{12}Cl$ et la Vanadinite $Pb^5V^3O^{12}Cl$; puis, des sesquioxydes comme l'alumine Al^2O^3 et le peroxyde de fer Fe^2O^3, tous deux rhomboédriques avec formes primitives identiques; enfin des bioxydes comme le Rutile TiO^2, la Cassitérite SnO^2, la Polianite MnO^2 (1), lesquels cristallisent en prismes quadratiques, avec des paramètres presque identiques, qui sont aussi ceux du Zircon, dont la formule peut s'écrire $(Zr, Si)O^2$.

(1) Voir Ed. Dana et S. Penfield, *Amer. Journal* [3], XXXV, p. 243.

L'inspection des tableaux précédents suggère déjà une remarque : c'est que l'isomorphisme ne doit pas être entendu dans le sens d'une absolue identité des formes, puisque l'angle des carbonates rhombiques peut varier de près de deux degrés et celui des carbonates rhomboédriques de deux degrés et demi. Aussi quelques auteurs ont-ils propoposé de désigner ces identités approchées par le nom d'*Homœomorphisme*. D'une façon générale, on admet que la tolérance, en fait d'angles divers, peut s'élever jusqu'à 4 degrés.

Mélanges isomorphes. — Le choix du mode de cristallisation d'un corps étant déterminé par la forme et la symétrie de sa particule, on conçoit que deux corps isomorphes puissent entrer en association l'un avec l'autre et se remplacer mutuellement, *en toutes proportions*, dans un même édifice cristallin. C'est ainsi que se produisent les *mélanges isomorphes*.

Par exemple, en mélangeant des dissolutions des trois sulfates de magnésie, de manganèse et de zinc, on obtient des cristaux dont l'analyse conduit à la formule :

$$x(MgSO^4 + 7H^2O) + y(MnSO^4 + 7H^2O) + z(ZnSO^4 + 7H^2O),$$

x, y et z étant des nombres positifs *quelconques*. De même les cristaux naturels du péridot-olivine se révèlent à l'analyse comme formés de :

$$x(Mg^2SiO^4) + y(Fe^2SiO^4).$$

Les carbonates rhomboédriques, dont nous avons déjà parlé, peuvent s'unir en toutes proportions et donner naissance à des *calcites* ou *dolomies ferrifères*, dites aussi *spaths brunissants*. L'angle des rhomboèdres résultants, toujours compris entre 105 et 107 degrés, est d'autant plus voisin de ce dernier nombre que la quantité de fer est plus considérable. A ce point de vue, en partant de la calcite $CaCO^3$, Beudant a pu établir que l'accroissement de l'angle dièdre du rhomboèdre était arithmétiquement proportionnel à l'accroissement de la quantité de fer.

On rencontre aussi, sous la forme régulièrement hexagonale, des mélanges isomorphes de phosphate et d'arséniate de plomb, parfois même avec du phosphate de chaux.

La famille des grenats offre aussi un remarquable exemple d'isomorphisme. Le grenat *grossulaire*, dans toute sa pureté, est un silicate d'alumine et de chaux, dont la composition répond à $Ca^6Al^4Si^6O^{24}$, ce qu'on peut interpréter par

$$3\{Ca^2SiO^4\} + Al^4Si^3O^{12}.$$

Cela posé, dans la plupart des grenats grossulaires, on reconnait la présence de quantités variables d'oxyde ferrique Fe^2O^3, d'oxyde ferreux FeO et d'oxyde manganeux MnO. Or, si l'on sépare, d'un côté la proportion d'oxygène qui peut se combiner avec Ca, Fe, Mn, pour former des protoxydes de formule générale RO, d'autre part celle qui s'unit à Fe et à Al pour former des ses-

quioxydes de formule générale R^2O^3, enfin celle qui doit être combinée au silicium sous forme de SiO^2, on trouve que ces trois quantités d'oxygène restent toujours entre elles comme les nombres 1 : 1 : 2.

On peut donc dire que les proportions relatives des divers oxydes sont constantes, mais que, dans chacun des groupes RO ou R^2O^3, les oxydes du calcium, du fer et du manganèse, d'une part, les sesquioxydes du fer et de l'aluminium, d'autre part, se remplacent en toutes proportions, la formule générale du grenat demeurant

$$(RO)^6.(R^2O^3)^2.(SiO^2)^6.$$

C'est donc comme s'il se produisait un mélange isomorphe des divers silicates qui peuvent se grouper sous cette commune formule et qui, soit individuellement, soit ensemble, affectionnent la cristallisation en dodécaèdres rhomboïdaux et en trapézoèdres du système cubique.

On remarquera que le fait essentiel de l'isomorphisme, au point de vue chimique, se résume en ce que, dans la formule d'un corps cristallisable, certains éléments simples peuvent être remplacés par d'autres. Il importe donc de connaître les groupes de corps entre lesquels peuvent se faire ces substitutions. L'expérience enseigne que ce sont surtout les suivants :

(Cl, Br, Io, Fl) — (Li, Na, K) — (S, Se, Te) — (Gl, Mg, Zn) — (Ca, Sr, Ba, Pb) — (Al, Fe, Mn, Cr) — (Fl, O) — (Ag, Cu) — (Na, Ca) — (Mg, Zn, Fe, Mn, Co, Ni).

Influence des volumes moléculaires. Stabilité de certaines combinaisons. — Il est une condition que le simple bon sens a paru indiquer comme nécessaire à la production des mélanges isomorphes : c'est l'identité, ou tout au moins la quasi-identité des *volumes moléculaires*. En effet, si la forme des particules détermine le choix du système cristallin, c'est le volume de celles-ci qui règle la dimension du noyau, et deux substances ne peuvent cristalliser ensemble que si elles admettent à peu près le même noyau.

C'est le résultat que l'expérience avait enseigné à Dumas et à Kopp, si bien que plusieurs chimistes, et en particulier Rammelsberg, ont considéré comme la vraie cause de l'isomorphine, de préférence à l'identité de forme, l'équivalence du volume moléculaire, représenté par le rapport du poids moléculaire au poids spécifique.

Il est certain que plus les volumes moléculaires approchent de l'égalité et plus l'isomorphisme est parfait. Ainsi les carbonates rhomboédriques de chaux et de magnésie, qui diffèrent le plus à cet égard (le volume moléculaire de la Calcite étant 1 et celui de la Giobertite 0,76), ne semblent pouvoir s'unir que dans des rapports qui s'écartent très peu de un équivalent de $CaCO^3$ pour un de $MgCO^3$. Au contraire les carbonates de fer et de magnésie, dont les volumes respectifs sont 0,83 et 0,77, se mélangent beaucoup plus facilement entre eux. Encore n'est-il pas certain qu'ils puissent s'unir *en toutes propor-*

tions. Du moins il y a certaines proportions relatives qui paraissent beaucoup plus souvent réalisées que d'autres et qui donnent lieu à des espèces telles que la *Sidéroplésite* ($2Fe\,CO^3 + Mg\,CO^3$), la *Pistomésite* ($Fe\,CO^3 + Mg\,CO^3$), le *Mésitine* ($Fe\,CO^3 + 2\,Mg\,CO^3$).

Ce fait est assez général dans les mélanges isomorphes. Il atteste que si l'existence de rapports simples entre les éléments constituants n'est pas absolument nécessaire, du moins elle peut être de nature à donner à l'édifice cristallin une plus grande stabilité. Remarquons seulement que le volume moléculaire, tel qu'il a été défini, convient à la molécule *chimique*, et peut être différent pour la particule complexe.

Propriétés physiques des mélanges isomorphes. — On a cru longtemps que, quand deux ou plusieurs substances isomorphes se mélangent dans le même édifice cristallin, chacune d'elles peut garder son individualité propre. Il n'y aurait plus, comme dans le cas de la combinaison chimique, destruction des groupements atomiques anciens et formation de groupements nouveaux. Dans ce cas, il semble naturel de penser que les propriétés physiques du cristal résultant, telles que sa densité, la valeur et la situation de ses constantes optiques, etc., doivent être en rapport avec celles des éléments constituants.

C'est ce que paraît confirmer l'expérience, au point que la plupart des propriétés physiques d'un individu cristallin, formé par voie de mélanges isomorphes, sont représentées assez exactement par une sorte de moyenne arithmétique des propriétés de chacun des éléments (en tenant compte, bien entendu, de leurs proportions relatives). Ainsi, en faisant cristalliser ensemble deux sels isomorphes, les sulfates de nickel et de magnésie, M. Dufet (1) a constaté la loi suivante : Les différences entre les indices de réfraction du mélange et ceux des sels composants sont en raison inverse du nombre d'équivalents des deux sels qui entrent dans le mélange. De son côté, Mallard a donné (2) des formules générales permettant de déduire, de la connaissance des propriétés optiques de deux ou plusieurs substances isomorphes, celle des propriétés optiques d'un cristal contenant des proportions connues de chacune de ces substances. Ces formules, appliquées à diverses données d'expérience, ont fourni des résultats assez satisfaisants pour permettre de considérer les mélanges cristallins isomorphes comme formés par la juxtaposition de portions infiniment petites des réseaux des corps composants, dont chacune conserverait, sans altération sensible, ses propriétés optiques.

Extension de la notion de l'isomorphisme. — L'ensemble des faits que nous venons d'étudier constitue ce qu'on peut appeler l'isomorphisme restreint. Mais la notion de l'isomorphisme est, en réalité, beaucoup plus étendue. L'identité, ou tout au moins la grande similitude des formes cristallines, ainsi que la

(1) *Bull. Soc. minér.*, I, p. 58 ; II, p. 140 ; III, p. 180. — (2) *Ann. des mines*, 7e série, XIX, p. 256. — *Bull. Soc. minér.*, IV, p. 71.

propriété de former des mélanges isomorphes, existent entre des corps dont les formules chimiques ne laisseraient pas soupçonner l'analogie. De ce genre est l'isomorphisme des fluorures doubles de titane avec les oxyfluorures de niobium et de tungstène, signalé par M. de Marignac; celui de l'acide silicotungstique avec les silicotungstates acides de baryte et de chaux, constaté par le même savant; enfin l'isomorphisme des tungstoborates et métatungstates de baryum, établi par M. Klein (1) et qualifié par lui d'*isomorphisme de masse*. Dans ce cas, on peut dire, avec M. de Marignac, que *deux composés, renfermant un élément ou un groupe d'éléments communs qui en forme de beaucoup la plus grande partie en poids, sont isomorphes même quand les éléments par lesquels ils diffèrent n'ont pas une constitution atomique semblable.*

D'autre part, il y a des corps de même constitution chimique qui ne cristallisent pas dans le même système et qui pourtant offrent, dans la valeur de leurs angles principaux, une frappante similitude. Par exemple, l'Hypersthène et la Bronzite ont exactement la même formule $RSiO^3$ que le Pyroxène, avec $R = m\,Mg \pm n\,Fe$. L'angle *mm* de ces deux espèces est compris entre 86 et 87 degrés, celui du Pyroxène étant 87°6′ et, si l'on considère les angles formés par les faces consécutives des zones principales, on les trouve presque identiques dans les trois substances. Pourtant les deux premières sont réputées rhombiques, tandis que la troisième est monoclinique.

De plus, à ne considérer que la valeur des angles, on doit rattacher à cette série la Rhodonite $MnSiO^3$, qui pourtant est triclinique.

Dans ces différents cas, il y a, non isomorphisme proprement dit, mais *Isogonisme*, suivant le mot proposé par M. Zehme (2). Et comme les angles dièdres représentent une réalité mesurable, tandis que les systèmes cristallins sont une conception de l'esprit, on comprend que Rammelsberg ait pu se demander si ces systèmes ne seraient pas des cadres artificiels, au respect desquels la nature ne s'astreint pas.

Toutefois il y aurait danger à laisser ébranler, par des faits de cette nature, le crédit des théories cristallographiques, et il importe de rechercher si, sans rien abandonner de ces dernières, il ne serait pas possible d'expliquer rationnellement ces apparentes anomalies. Voyons d'abord de quelle façon Mallard y était parvenu (3).

§ 2

THÉORIES DE L'ISOMORPHISME

Théorie de Mallard. — Le point de départ des idées de Mallard est une série de recherches sur l'isomorphisme des azotates et des chlorates. Le chlo-

(1) *Bull. Soc. minér.*, 1882, p. 260. — (2) C'est aussi à ce phénomène que M. Wyrouboff a appliqué la dénomination d'*Homœomorphisme*, déjà employée dans une autre acception. — (3) *Bull. soc. minér.*, VII (1884), p. 349..

rate de potasse, monoclinique, forme des mélanges isomorphes avec le chlorate de soude cubique et avec l'azotate de soude, de symétrie rhomboédrique. Les azotates d'ammoniaque, de potasse, de soude et d'argent sont, au point de vue chimique, pleinement isomorphes entre eux, bien que le troisième soit rhomboédrique et que les paramètres rhombiques des trois autres soient incompatibles.

D'un autre côté, l'expérience montre que la plupart de ces corps paraissent changer de système cristallin avec la température. Ainsi le chlorate de soude peut être tantôt rhomboédrique, tantôt cubique. L'azotate d'ammoniaque, rhombique au-dessous de 36°, encore rhombique, mais avec de nouveaux paramètres, entre 36 et 87°, devient rhomboédrique entre 87° et 127° et passe, au-dessus de cette dernière température, à la symétrie cubique. L'azotate de potasse, rhombique à la température ordinaire, est rhomboédrique quand il s'approche de son point de fusion, etc.

Cependant il est difficile d'imaginer que la symétrie des particules puisse être aussi variable. Une supposition plus vraisemblable consiste à admettre que ces transformations de systèmes cristallins sont plus apparentes que réelles et la facilité avec laquelle interviennent les formes cubiques donne à penser qu'il s'agit de cristaux dont la symétrie doit être, en réalité, peu éloignée de celle qui convient au réseau du cube. C'est ce que Mallard a cherché à établir par une discussion approfondie des paramètres cristallins. Nous avons indiqué plus haut les conséquences auxquelles il avait été conduit relativement à la grande généralité des réseaux quasi-cubiques. Dans ce cas, l'association, en toutes proportions, de particules complexes ou même de portions de réseau à peu près identiques, se comprendrait comme ne devant rien changer à la symétrie totale de l'édifice qui les admet. Les éléments composants conserveraient ainsi leur individualité dans le groupement.

Cependant cette théorie se heurte à des objections sérieuses, que M. Wallerant a surtout fait valoir, et qui l'ont conduit à une conception sensiblement différente (1).

Notions nouvelles sur l'isomorphisme. — L'expérience enseigne que, des trois conditions indiquées par Mitscherlich pour la réalisation de l'isomorphisme, à savoir analogie de composition chimique, similitude des formes cristallines, enfin faculté de syncristallisation en proportions quelconques, il n'en est pas une qui ne puisse faire défaut quand les deux autres sont satisfaites. Ainsi la galène PbS et l'Argyrose Ag^2S se mélangent pour cristalliser, et il en est de même pour des acides et des sels à hydratations différentes. D'autre part des mélanges fondus d'azotates alcalins laissent voir le passage progressif d'une forme uniaxe à une forme biaxe. Enfin les propriétés chimiques des corps qu'on suppose isomorphes empêchent bien souvent qu'on

(1) *Ann. de chimie et de physique*, 8e série, t. VIII (1906); voir aussi Wallerant, *Bull. soc. minér.*, t. XXVIII; Wyrouboff, *id.*, t. II, IX, XIX.

puisse les fondre, les dissoudre ou les vaporiser ensemble. Même quand la syncristallisation est réalisable, ce peut être seulement entre certaines limites de température ou de composition.

D'autre part, il n'est aucun des trois caractères, pris isolément, qui puisse prétendre à servir seul pour la définition de l'isomorphisme.

Rapports mutuels des composés isomorphes et de leurs constituants. — Nous avons dit plus haut qu'on admettait généralement que les propriétés physiques d'un mélange isomorphe étaient une sorte de moyenne arithmétique entre celles des composants. Ainsi deux corps pourvus des indices de réfraction n et n', s'associant respectivement dans la proportion de p à p', engendreraient un mélange isomorphe dont l'indice N serait donné, d'après la loi de Dufet, par la relation

$$N = \frac{np + n'p'}{p + p'}$$

Et il en devrait être de même pour les autres propriétés physiques, densités, constantes optiques, constantes cristallographiques.

Il s'en faut cependant, et souvent de beaucoup, que cette proportionnalité soit réalisée. Ce qu'il est permis de dire, c'est que, en général, à la différence des composés à proportions définies, *les propriétés physiques des mélanges isomorphes varient d'une façon continue avec la composition.* Leurs constantes physiques sont des fonctions continues des constantes correspondantes des composants. Mais ces fonctions ne sont pas linéaires, et peuvent être compliquées. Dans certains cas, ce seront des hyperbolès qui, dans les limites des expériences, pourront se confondre suffisamment avec des lignes droites pour faire croire à une proportionnalité plus apparente que réelle.

A cet égard il convient de remarquer que cette proportionnalité ne peut jamais être réalisée pour tous les éléments à la fois ; car s'il en est qui puissent dépendre directement des angles dièdres, d'autres, comme les paramètres, dépendent des lignes trigonométriques de ces angles. D'autre part, en étudiant la variation de certains paramètres dans des séries isomorphes, on reconnaît que les uns croissent d'une façon continue avec le changement de composition, tandis que d'autres passent par un maximum.

En tout cas, l'étude des mélanges des tartrates de thallium et de potassium, ainsi que celle des chlorates de potassium et de sodium, met en évidence la formation de cristaux mixtes dont les propriétés ne sont nullement comprises entre celles des composants (1).

Remarquons d'ailleurs avec M. Wallerant que, puisqu'un mélange isomorphe présente des formes cristallines nettes et définies, il semble qu'il doive, comme tous les corps cristallisés, être constitué de *particules complexes*, identiques,

(1) Herbette, *Contribution à l'étude de l'isomorphisme.*

identiquement orientées et disposées en réseau. Il ne peut pas y avoir mélange indifférent de diverses sortes de particules.

De plus, l'étude des mélanges isomorphes du chlorate et du bromate de soude, comme de ceux du nitrate de plomb et du nitrate de baryte, montre que la particule complexe du mélange peut présenter une symétrie différente de celle des corps mélangés. Donc la particule de ces derniers ne se conserve pas. Il s'en forme une nouvelle qui, le plus souvent, garde le genre de symétrie des corps mélangés, mais qui, dans certains cas, en adopte un autre (1).

Mais les particules complexes elles-mêmes résultent du groupement de *particules fondamentales*, contenant un nombre plus ou moins grand de molécules chimiques. Supposons que, dans chacune de ces particules, 1, 2, 3... *n* molécules d'un corps puissent être remplacées par 1, 2, 3... *n* molécules d'un autre, sans que les particules cessent d'être identiques ou symétriques quant à leur forme; il en résultera un nouvel édifice cristallin, constitué sur le même plan que l'édifice d'un seul corps, mais participant des propriétés des deux corps mélangés. Si les particules fondamentales des deux corps renferment le même nombre de molécules, semblablement placées, on pourra passer de l'un à l'autre par substitution des molécules du second à celles du premier, et l'on obtiendra une série continue de cristaux mixtes, qui seront *isomorphes* dans le sens strict du mot. S'il n'y a pas le même nombre de molécules, et qu'elles ne soient pas semblablement placées, le passage sera impossible, et il y aura deux ou plusieurs séries de cristaux mixtes, ce qui constituera l'*isodimorphisme* ou plutôt l'*isopolymorphisme*.

Dans cette conception, on conçoit que les particules mixtes ainsi engendrées doivent donner naissance à des édifices voisins de ceux que formaient les particules primitives, qu'elles adoptent le même réseau, et que la symétrie puisse être la même, sans que ce soit nécessaire.

Analogie avec les alliages et les solutions. Mélanges eutectiques. — Envisagés à ce point de vue, les mélanges isomorphes présentent avec les dissolutions une analogie frappante, qui a été signalée tout d'abord par MM. Lecoq de Boisbaudran et Van't Hoff. Comme d'ailleurs il y a la même analogie entre les dissolutions et les *alliages*, qui sont des solutions solides d'un métal dans un autre, il y a avantage à s'adresser, soit aux dissolutions, soit aux alliages, pour bien juger des phénomènes de l'isomorphisme (2).

Considérons le cas d'un alliage binaire, formé de plomb et d'antimoine, métaux qui ne sont pas susceptibles de donner deux séries de cristaux mixtes. Portons en abscisses (fig. 356) les proportions respectives des deux métaux, depuis M = 100 % Pb et 0 % Sb, jusqu'à N = 100 % Sb et 0 % Pb. Quant aux températures de fusion, portons-les en ordonnées, A représentant le point de fusion du plomb (326°) et B celui de l'antimoine (631°).

(1) Wallerant, *Bull. soc. minér.*, nov. 1898. — (2) Il convient de rappeler que ce genre de considérations a été particulièrement développé par M. Backhuis Roozeboom.

Cela posé, soit un alliage de 93 % de Pb et 7 % de Sb, porté à la température de 700° et représenté par le point C. Si l'on abaisse la température, en descendant le long de l'ordonnée *Cc*, on constate que l'alliage demeure liquide, pour cette composition, jusqu'à la température de 290°, marquée par le point *a*. Le refroidissement continuant, il commence à se séparer des cristaux de plomb ce qui change peu à peu la composition de l'alliage, dont une partie demeure liquide jusqu'à ce qu'on atteigne en E, à la température de 247°, une proportion de 13 % Sb pour 87 % Pb. A ce moment, tout l'alliage se solidifie, les deux métaux se déposant en quantité proportionnelle.

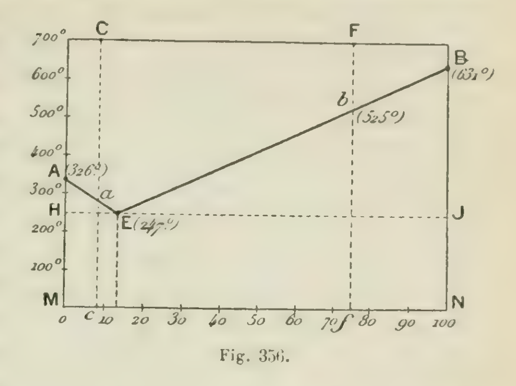


Fig. 356.

Ainsi, en se débarrassant par refroidissement de l'élément en excès, l'alliage tend vers une composition bien déterminée, qui lui assure un point de fusion plus bas que pour tout autre, et inférieur au point de fusion du plus fusible des deux métaux. C'est ce que M. Guthrie a nommé un *mélange eutectique*, dont la température de fusion est la *température eutectique*.

Inversement, si l'on partait, à 700°, d'un alliage de 75 % Sb et 25 % Pb, on resterait dans une phase liquide, jusqu'à la température de 525°, marquée en *b*, où la suite du refroidissement déterminerait la séparation de cristaux d'antimoine. Cette séparation continuerait, le long de la ligne B*b*E, jusqu'à ce que la composition et la température eutectiques fussent atteintes.

Le champ au-dessus de AEB appartient tout entier à la phase liquide, AE marquant la séparation de Pb et BE celle de Sb. Au-dessous de E, tout est solide. Les champs AEH et BEJ représentent la phase pâteuse, c'est-à-dire l'alliage liquide renfermant des cristaux séparés de Pb d'un côté, de Sb de l'autre, de sorte que les domaines en question correspondent aux solutions *sursaturées*, l'une en plomb, l'autre en antimoine. Si la composition eutectique est atteinte dès le début, l'alliage reste liquide et invariable de nature jusqu'à ce que la température de 247° soit atteinte, ce qui entraîne la prise simultanée des deux métaux.

Courbes caractéristiques des mélanges isomorphes. — Cela posé, si les deux constituants d'un mélange peuvent, par fusion ou autrement, se dissoudre à l'état solide l'un dans l'autre, il se fait des *mélanges isomorphes*. Le type le plus simple, correspondant au cas où il n'y a qu'une seule série de cristaux mixtes, est représenté par la figure 357, construite sur le même principe que la précédente.

C étant le point de fusion du corps A, et D celui du corps B, le commence-

ment de la solidification est exprimé par la courbe CED, réunissant les points à partir desquels il commence à se former des cristaux mixtes. A la fin de la solidification correspond la courbe CFD, construite de la façon suivante :

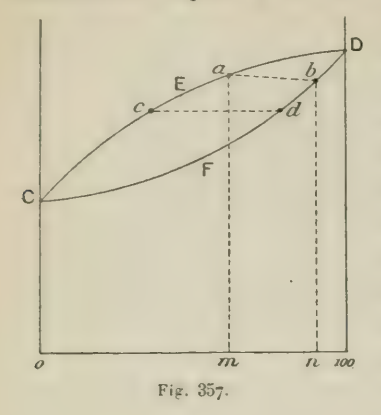


Fig. 357.

Soit un flux de composition exprimée par l'abscisse qui aboutit en *m*. A la température marquée par l'intersection *a* de la verticale de *m* avec la courbe CED, il commence à se former des cristaux mixtes d'A et de B. Si on détermine la composition de ces cristaux, on trouve qu'elle correspond à une certaine abscisse aboutissant en *n*. On trace l'ordonnée du point *n*, et sa rencontre avec une horizontale menée par *a* donne en *b* un point de la courbe CFD.

Au-dessus de CED, tout est liquide; au-dessous de CFD, tout est solide. Le domaine intermédiaire correspond à la coexistence du flux avec les cristaux mixtes.

Les courbes caractéristiques n'ont pas uniquement la forme générale de la figure 357. Elles peuvent présenter des ondulations, correspondant à des maxima et à des minima. Elles peuvent aussi être discontinues, et offrir des rebroussements de la courbe supérieure, auxquels correspondent des décrochements horizontaux de la seconde.

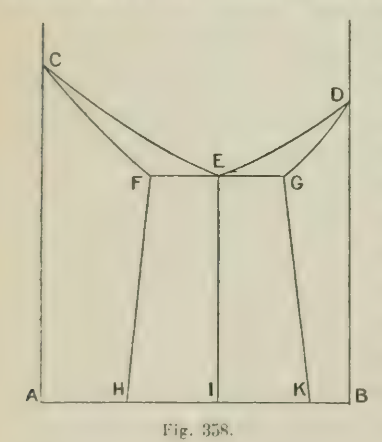


Fig. 358.

La forme de la représentation schématique est nécessairement différente quand il peut se former deux séries de cristaux mixtes. Un type souvent réalisé est celui de la figure 358 (1), où il se produit en E un point eutectique, et où il y a discontinuité entre F et G, sur l'horizontale du point E. Le domaine CFE représente le mélange des cristaux mixtes α avec le flux; en DGE, le flux est mélangé avec les cristaux mixtes β. Les premiers cristaux mixtes occupent seuls le domaine CFHA, les seconds le domaine DGKB. En FEIH, il y a mélange des cristaux α avec l'eutectique α + β; en EGKI, le même eutectique est mélangé de cristaux β. C'est un cas d'*isodimorphisme* bien caractérisé.

Dans ce type, à la température eutectique, il y a deux sortes de cristaux mixtes qui sont stables, ceux qui ont respectivement la composition de F et de G. Il se produit donc en E un *conglomérat eutectique* de deux espèces de cris-

(1) Rappelons que, dans cette figure, A représente 100 du corps A et 0 du corps B, tandis que B représente 0 du corps A et 100 du corps B.

taux, où les cristaux F et G sont associés suivant des quantités proportionnelles aux longueurs EF et EG. FG représente la lacune qui se produit dans la composition des cristaux mixtes. Si par surfusion on réussissait à faire descendre la température au-dessous de E (auquel cas les courbes AF et BG se prolongeraient en dessous de FG), on obtiendrait non un conglomérat, mais un mélange cristallin instable.

M. Wyrouboff a constaté que les trichromates de potassium et de sodium, qui se déposent ensemble en toutes proportions, engendrent trois formes de cristaux mixtes, dont deux concordent avec les formes des sels mélangés, tandis que la troisième est tout à fait différente. Le chlorure et le bromure de baryum donnent aussi trois séries de cristaux mixtes dans les mêmes conditions.

§ 3

POLYMORPHISME

Définition du polymorphisme. — L'Isomorphisme a une contre-partie : c'est le *Dimorphisme* ou *Polymorphisme*. On appelle ainsi la propriété que possèdent certains corps d'offrir, sans qu'il y ait de changement dans la composition chimique, plusieurs formes cristallines incompatibles entre elles ; soit qu'elles appartiennent à des systèmes différents, soit que, présentant le même genre de symétrie, elles impliquent des rapports paramétriques qui ne peuvent pas être ramenés les uns aux autres.

Par exemple, le *Soufre* naturel et celui qu'on obtient par voie humide dans les laboratoires sont rhombiques, tandis que le soufre qui cristallise après fusion est monoclinique (1). Le zinc sulfuré ZnS est cubique dans la *Blende* et hexagonal dans la *Wurtzite*. L'antimoine oxydé Sb^2O^3, cubique avec la *Sénarmontite*, est rhombique avec l'*Exitèle*. La *Pyrite jaune* de fer FeS^2 est cubique, tandis que la *Marcasite* ou *Pyrite blanche*, malgré une composition identique, est rhombique. Le carbonate de chaux $CaCO^3$ est rhomboédrique dans la *Calcite* et rhombique dans l'*Aragonite*. Le silicate d'alumine anhydre Al^2SiO^5 est rhombique et presque quadratique dans l'*Andalousite*, triclinique dans le *Disthène*. Le *Diamant*, cubique, est du carbone pur comme le *Graphite* hexagonal. L'oxyde de titane TiO^2 cristallise sous trois formes distinctes : 1° le *Rutile*, quadratique avec R. A. = 1 : 0,911 ; 2° l'*Anatase*, dont les cristaux, en forme de quadratoctaèdres, dérivent d'un autre réseau quadratique avec R. A. = 1 : 0,888 ; 3° la *Brookite*, cristallisée dans le système rhombique.

(1) En réalité, les modifications du soufre sont beaucoup plus nombreuses. On en connait actuellement *neuf*, dont deux seulement sont stables à la température ordinaire. L'une des modifications, obtenue par dissolution de l'hyposulfite de sodium dans une liqueur saturée d'acide chlorhydrique, est rhomboédrique. Les autres sont monocliniques ou orthorhombiques.

Lois expérimentales du phénomène. — Les cristaux naturels étant pour la plupart produits dans des conditions qui nous sont inconnues, c'est en opérant sur des substances de laboratoire qu'on peut espérer de reconnaître les lois du phénomène. A cet égard, ce que l'expérience enseigne de plus net, c'est qu'en général chaque forme correspond à un état spécial de stabilité, qui dépend des circonstances ambiantes.

Ainsi on sait, depuis les expériences de M. Gernez, que le soufre monoclinique se transforme lentement à l'air en une infinité de petits octaèdres du soufre rhombique. La transformation est immédiate et accompagnée de dégagement de chaleur, lorsqu'on raye un cristal monoclinique ou qu'on le touche avec un cristal rhombique. Il se forme des taches opaques aux points rayés et celles-ci envahissent bientôt toute la masse.

Mallard a constaté des faits analogues pour le chlorate de soude (1). Tantôt, à la température ordinaire, ce sel cristallise en petits cubes très nets; tantôt, à cette même température, il forme des flèches très biréfringentes, ainsi que de petits cristaux rhomboédriques de 107° environ. Mais bientôt la biréfringence cesse, d'abord à l'extrémité des flèches, puis tout le long, et cette transformation est immédiate lorsqu'on touche un cristal biréfringent avec un cube de chlorate ou avec un cristal déjà transformé. Il y a donc, dans ce sel, au moins deux formes, l'une stable, cubique, et l'autre instable, rhomboédrique.

Le bromate de soude possède exactement le même dimorphisme que le chlorate. Seulement la transformation des cristaux biréfringents est plus lente et toujours incomplète. M. Wyrouboff a d'ailleurs constaté que la forme biréfringente du bromate est d'autant plus stable que la température de cristallisation est plus basse.

La sulfate anhydre de potasse donne à la température ordinaire des cristaux rhombiques et pseudo-sénaires, l'angle *mm* étant égal à 120°24'. A 380 degrés, le cristal devient provisoirement uniaxe et négatif; à 460 degrés, il est uniaxe positif, mais seulement d'une manière transitoire. Enfin, entre 600 et 650 degrés, il devient rigoureusement sénaire et définitivement négatif.

L'iodure d'argent, hexagonal et énergiquement biréfringent à la température ordinaire, devient subitement uniréfringent à + 146°. Le rapport d'axes de cette substance est 1 : 0,8196, c'est-à-dire le même que celui du chlorate et du bromate de soude. Le réseau est donc pseudo-cubique.

MM. Mallard et Le Chatelier (2) ont constaté que la transformation de l'iodure d'argent absorbait 6,8 petites calories par gramme. On doit voir, dans cette absorption de chaleur, l'équivalent du travail mécanique dépensé par le changement de position des particules.

A propos de l'iodure d'argent, il est un fait qui mérite d'être mis en lumière :

(1) *Bull. Soc. minér.*, VII (1884), p. 349.
(2) Mallard et Le Chatelier, *Comptes rendus*, XCVII, juillet 1883.

M. Fizeau a remarqué que ce corps, quand on le chauffe, subit une *contraction cubique*, la dilatation de l'axe horizontal ne compensant pas le raccourcissement de l'axe vertical. Or c'est par excès que le paramètre 0,8196, multiplié par $\frac{3}{2}$, diffère de 1,225, paramètre de l'axe ternaire du noyau cubique en fonction des axes binaires. Le raccourcissement observé par M. Fizeau et qui résulte d'ailleurs d'une nouvelle disposition des parties différemment orientées apparaît donc, dans son étrangeté même, comme une nouvelle affirmation de la tendance des corps naturels vers le maximum de symétrie.

Lorsqu'un corps est dimorphe, son changement de forme s'accomplit généralement à une température déterminée. Mais la pression joue aussi un rôle dans le phénomène. En général une augmentation de la pression élève la température de transformation. Si l'on porte en abscisses la pression, et en ordonnées la température, on construit la *courbe de transformation* (1) du corps, séparant l'espace en deux domaines : l'un, au-dessous de la courbe, pour lequel le corps originel est stable; l'autre, au-dessus, répondant à la stabilité du corps transformé. La transformation entraîne une discontinuité dans la variation des constantes physiques et se traduit d'ordinaire par un brusque changement du volume ou des propriétés optiques. Il peut aussi se produire un arrêt dans la variation progressive d'une constante, par exemple lorsqu'un cristal biaxe devient progressivement uniaxe et ne cesse plus ensuite de l'être.

Il y a, pour un corps polymorphe, autant de courbes de transformation que de formes réalisables.

Certains corps polymorphes peuvent être maintenus, mais à l'état instable, au-dessus de leur température de fusion, par *surchauffe cristalline*. C'est, comme l'a montré M. Gernez, le cas du soufre orthorhombique. Seulement, au-dessus de 95°,6, ce soufre, touché par une aiguille monoclinique, se transforme immédiatement. Inversement, une *surfusion cristalline* peut maintenir le soufre monoclinique au-dessous de 95°,6; mais alors le contact d'un cristal rhombique le transforme aussitôt. La surfusion est l'analogue de la *sursaturation*.

Relations de symétrie des modifications polymorphiques. — Dans un corps polymorphe, on observe que, presque toujours, la modification la plus symétrique est une forme-limite de celle qui l'est le moins. Ainsi, en doublant le chiffre habituellement adopté pour le paramètre vertical de la Brookite, on obtient R. A. = 0,936 : 1 : 0,842. On voit d'abord que les deux axes horizontaux sont voisins de l'égalité, c'est-à-dire que la substance est pseudo-quadratique ; d'ailleurs, si l'on fait l'axe vertical du rutile égal à 0,842, le paramètre horizontal devient 0,93, c'est-à-dire égal à celui de l'un des axes de la Brookite. Cette dernière espèce possède donc bien une forme-limite, très voisine de celle du Rutile, lui-même peu différent de l'Anatase.

(1) Voir les travaux de M. Backhuis Roozeboom.

De même la calcite, rhomboédrique, est une forme limite de l'aragonite, qui est rhombique avec angle du prisme voisin de 120°. Au rouge-sombre, l'aragonite éclate en poussière blanche opaque, se transformant en calcite, dont la densité moindre est la cause de l'éclatement. M. Klein a constaté que l'axe optique de la calcite était perpendiculaire à la face p de l'aragonite. Les troncatures des arêtes de base de cette substance font entre elles des angles sensiblement égaux à ceux des rhomboèdres de calcite.

Le soufre monoclinique comporte un angle mm de 90°32′ et un angle pm de 94°6′. Les aiguilles sont donc voisines du prisme h^1g^1 du soufre orthorhombique. Dans ce dernier, les troncatures font avec la base des angles de 128° et 134°56′; avec le soufre monoclinique, les angles observés sont 127°58′ et 135°9′.

Quant au chlorate et au bromate de soude, l'axe de leur forme rhomboédrique est égal à 0,82, c'est-à-dire aux deux tiers de la valeur de l'axe ternaire d'un cube, relativement à celle des axes binaires prise pour unité. Les deux corps ont donc une symétrie-limite cubique, ce qui explique leur aptitude à offrir une modification isotrope.

La chaleur transforme la modification cubique du chlorate de soude en rhomboèdres d'environ 107°, sans que les cristaux perdent ni leur transparence ni la netteté de leurs arêtes. Il ne doit donc se produire qu'un très faible changement dans le réseau du corps. Cela se comprend du reste; car lorsque l'angle d'un rhomboèdre est exactement de 107°6′, la forme rhomboédrique de notation (30$\bar{3}$2), c'est-à-dire e^8, se trouve être exactement un cube. Donc en divisant les arêtes de ce cube en parties égales, on aura autant de réseaux cubiques, ayant pour plans réticulaires les plans du réseau rhomboédrique. Mais les mailles de ces réseaux cubiques ne porteront pas les mêmes particules que celles du cristal donné. Inversement, dans tout réseau cubique, les rangées réticulaires (11$\bar{8}$), (1$\bar{8}$1), et ($\bar{8}$11) déterminent un rhomboèdre de 107°6′.

Théories du polymorphisme. Association de réseaux. — En raison des faits qui viennent d'être exposés, Mallard, se fondant sur la fréquence reconnue des groupements entre cristaux à symétrie-limite, a été conduit (1) à supposer que les apparences polymorphes étaient produites par des combinaisons inégales entre portions réticulaires, diversement orientées, de cristaux appartenant à cette catégorie. Il suffirait d'après cela, pour engendrer le polymorphisme, que, parmi les modes de groupement dont une forme-limite est susceptible, quelques-uns fussent réalisés, de préférence à d'autres, dans certaines conditions déterminées. Une substance rhombique, à forme limite cubique, pourra offrir : 1° des individus à symétrie uniquement rhombique, formés par une seule orientation du réseau; 2° des individus produits par le groupement, plus ou moins enchevêtré, des six orientations admissibles; 3° des individus où

(1) Voir *Phénomènes optiques anomaux* et l'article CRISTALLOGRAPHIE dans l'*Encyclopédie chimique*; encore *Bull. Soc. minér.*, VII (1885), etc.

les diverses orientations seront mélangées d'une manière assez intime pour que l'ensemble offre extérieurement des formes cubiques parfaites. L'existence des formes du premier et du troisième type, qui sont incompatibles entre elles, constituera le polymorphisme.

C'est de cette façon qu'on peut dire que le Grenat est *trimorphe*; car la symétrie triclinique se laisse encore voir dans la Topazolite et, plus voilée dans l'Aplome, fait place, comme nous l'avons dit plus haut, à la symétrie rhombique de l'Ouwarowite, en attendant que le grenat du Tyrol atteigne la symétrie cubique parfaite. Seulement, dans ce cas, le polymorphisme est masqué, au premier coup d'œil, par la tendance des groupements à reconquérir la symétrie d'ordre supérieur.

Mallard, se fondant sur les observations optiques, a admis que le Rutile et l'Anatase étaient seulement pseudo-quadratiques, et que le véritable réseau de TiO^2 était plutôt monoclinique. Ce réseau paraît réalisé dans l'Anatase, dont les cristaux sont formés par une simple superposition de lamelles, tandis que la complexité de constitution est plus grande dans la Brookite et plus encore dans le Rutile. En concordance avec ce fait, on remarque que, la densité de l'Anatase étant voisine de 3,9, celle de la Brookite atteint 4,1 et celle du Rutile 4,27.

En somme, le polymorphisme serait la conséquence d'une sorte d'*isomorphisme réticulaire*, en vertu duquel des portions de réseaux peu différents, se mélangeant les unes avec les autres, engendreraient plusieurs sortes d'édifices cristallins.

Variété des particules complexes. — D'autres auteurs ont admis qu'un même corps, par un phénomène analogue à la polymérie, pouvait donner naissance à plusieurs sortes de molécules, à chacune desquelles correspondrait un genre déterminé de symétrie.

C'est dans le voisinage de cette conception que se place la théorie de M. Wallerant (1) pour qui la cause du polymorphisme devrait être cherchée dans la variété des combinaisons que peuvent réaliser les *particules fondamentales*, appelées à édifier une *particule complexe*.

En premier lieu, si la mise en jeu des éléments de symétrie, appliquée à une particule fondamentale initiale, suffit pour construire entièrement la particule complexe, du moins l'orientation de l'unité initiale est une donnée qu'il faut accepter telle quelle. Ce qui la détermine, c'est le fait que, par cette orientation, l'équilibre du système cristallin sera le mieux assuré. Si donc il arrive que, pour un corps, l'équilibre puisse se trouver réalisé par deux orientations de la particule fondamentale, cela pourra donner naissance à deux édifices cristallins, qui auront le même réseau, les mêmes éléments de symétrie, la même densité, mais pourront posséder des structures différentes et n'avoir pas les mêmes constantes optiques.

(1) *Bull. soc. minér.*, nov. 1898, juillet 1904; *Groupements cristallins*, p. 79.

Ce cas de polymorphisme est le plus simple. Les deux édifices pourront se mélanger ensemble dans un même cristal. C'est ce qu'on observe dans le quartz, où des parties dextrogyres peuvent coexister avec d'autres lévogyres; dans l'orthose, où deux variétés de même forme cristalline et de même densité ne diffèrent que par l'orientation du plan des axes optiques; enfin dans la zoïsite.

Un autre genre de polymorphisme, beaucoup plus fréquent, pourrait venir de la différence des particules complexes engendrées par une même particule fondamentale. Si celle-ci ne possède pas à proprement parler d'éléments réels de symétrie, il est permis et même raisonnable d'admettre qu'elle soit pourvue d'éléments-limites, dans lesquels résiderait précisément le principe de la symétrie de la particule complexe.

Or de même que les éléments-limites de cette dernière détermineraient la formation des macles, ainsi les éléments-limites d'une particule fondamentale peuvent la conduire à former des groupements différents. S'il s'agit de groupements *parfaits*, comme ceux qui ont été précédemment définis, une seule combinaison sera possible, et le corps sera *monomorphe*.

Mais si le groupement est *imparfait*, parce que les angles des éléments-limites de la particule fondamentale ne sont pas exactement ceux des éléments réels, on obtiendra plusieurs particules complexes différentes, quoique très voisines et comprenant le même nombre de particules fondamentales. Ces particules pourront se disposer sur des réseaux sinon identiques, du moins très peu différents.

Exemples de polymorphisme. — Par exemple, imaginons une particule fondamentale dont les éléments-limites consistent en un axe binaire, un centre et un plan. Si l'axe est perpendiculaire sur le plan, le groupement sera parfait; quatre particules fondamentales s'associeront en une particule complexe monoclinique. Le corps sera *monomorphe*.

Mais si l'axe est légèrement incliné sur le plan, il pourra se produire trois groupements distincts. Dans l'un, le centre et l'axe de la particule fondamentale seront les éléments du groupement, lequel possédera, en outre, un plan de symétrie *perpendiculaire sur l'axe*, c'est-à-dire ne coïncidant pas absolument avec le plan-limite des particules fondamentales. Dans un second groupement, ces dernières seront symétriquement placées par rapport au centre et au plan-limite; mais le groupement aura un axe-binaire qui ne coïncidera pas exactement avec l'axe binaire-limite des particules fondamentales. Enfin, dans un troisième groupement, le centre seul sera un élément réel, le plan et l'axe demeurant des éléments-limites.

De la sorte, la substance comportera deux formes monocliniques et une forme triclinique. Cette dernière possédera, à titre d'éléments-limites, un plan de symétrie et un axe binaire, faisant entre eux un angle peu différent de 90 degrés, et propres à devenir les éléments de symétrie de deux groupements. Tel paraît être justement le cas du *microcline* relativement à l'*orthose*.

Variation probable des particules. — Dans ce qui précède, nous avons supposé que les particules fondamentales demeuraient invariables; mais il peut très bien arriver qu'une élévation de température les modifie au point de rendre parfait un groupement qui dans l'état primitif n'était qu'imparfait.

On peut penser que c'est le cas de la Boracite. Quand on chauffe une lame mince de cette substance (1), les teintes de polarisation des divers secteurs de la lame changent d'une manière continue; puis, à une température voisine de 265 degrés, on cesse tout à coup d'apercevoir des colorations aux nicols croisés et le corps devient complètement isotrope. Le phénomène ne dépend ni de l'orientation de la lame ni de son épaisseur, et il est reversible; car, en laissant refroidir, on voit reparaître les mêmes couleurs qu'avant le changement d'état. La calcination ne modifie ni la forme de l'ellipsoïde d'élasticité optique ni la position des orientations différentes qu'il peut recevoir; elle ne modifie que le choix fait par chaque partie de la lame entre ces orientations.

Pour l'expliquer, on peut admettre qu'à la température ordinaire les éléments limites $4L^3$ et $4P$ de la particule fondamentale de la boracite ne font pas avec les éléments réels Λ^2 et $2P$ les angles qu'il conviendrait. Il en résulte, par voie de groupement imparfait, une particule complexe de symétrie réelle $\Lambda^2 2P$, et douée en outre d'éléments-limites, qui ne coïncident pas exactement en position avec ceux de la particule fondamentale, mais font avec les éléments réels les angles exigés par la symétrie cubique. C'est pourquoi les particules complexes, malgré leur symétrie restreinte, se disposent sur les mailles d'un réseau terquaternaire.

Or, à la température de 265°, les angles que les éléments-limites $4L^3$ et $4P$ font entre eux et avec les éléments réels Λ^2 $2P$ deviendraient normaux dans la particule fondamentale. A ce moment, les éléments-limites de la particule complexe se changeraient en éléments réels, et ainsi cette particule serait isotrope.

La transformation de la particule est également admise par M. Wyrouboff (2), qui considère qu'elle peut se faire de deux manières, ou graduellement, ou brusquement. Un même corps pourrait affecter deux formes de même symétrie apparente, mais dans l'une desquelles cette symétrie serait réelle, tandis qu'elle ne serait qu'approchée dans l'autre. La première résulterait d'un simple changement de position du réseau, sans changement dans la densité. Dans la seconde, il y aurait transformation simultanée du réseau et des particules, ce qui entraînerait une modification plus ou moins profonde des propriétés physiques.

Transformation avec production de macles. — Lorsque le polymorphisme est direct, selon l'expression de M. Wyrouboff, c'est-à-dire lorsque le réseau reste sensiblement le même dans le passage d'une forme à l'autre, on

(1) Klein, *Mineralog. Mittheilungen*, VIII; Mallard, *Bull. Soc. minér.*, V, VI.
(2) *Bull. soc. minér.*, XXIX, p. 345.

peut se rendre compte de la transformation qui amène l'apparition ou la disparition des éléments de symétrie (1).

En effet M. Mügge a constaté que presque toujours, avant le passage de la forme la moins symétrique à celle qui l'est le plus, il se produit des macles, dans lesquelles les cristaux composants sont symétriquement disposés par rapport aux rangées et aux plans réticulaires qui vont devenir des axes binaires ou des plans de symétrie. Or, d'après les conditions qui président à la formation des macles mécaniques, ces éléments doivent appartenir, en qualité d'éléments diamétraux, à la particule complexe. D'ailleurs l'observation enseigne aussi que, lors du passage à la forme la plus symétrique, quand une rangée devient un axe binaire, le plan de nulle déformation lui devient perpendiculaire.

M. Wallerant en conclut que la particule complexe subit une déformation du même ordre que celle du réseau; c'est-à-dire que, dans cette particule, des molécules symétriquement orientées, mais diamétralement placées, se déplaceraient parallèlement à elles-mêmes de manière à venir occuper des positions symétriques. Si des macles se produisent au voisinage de la transformation, cela tiendrait en grande partie à ce que, la rangée principale s'approchant de plus en plus de la normale au plan de macle, la translation nécessaire pour amener le cristal dans une position symétrique devient de plus en plus petite.

CHAPITRE V

CRISTALLOGÉNIE

§ 1

PARTICULARITÉS DE LA STRUCTURE DES CRISTAUX

Observations microscopiques. — Le mode de formation des cristaux peut se conclure, avec plus ou moins de vraisemblance, d'observations relatives à leur structure interne. Il peut aussi être étudié directement par des expériences de cristallisation artificielle. Occupons-nous d'abord de la première de ces méthodes.

Le microscope ne se borne pas à nous faire connaître, par l'emploi de la lumière polarisée, la structure, parfois si compliquée, de certains réseaux cristallins. Il met aussi en évidence diverses particularités, dont l'explication

(1) Wallerant. *Bull. soc. minér.*, juillet 1904.

ne peut être cherchée ailleurs que dans les circonstances mêmes de la cristallisation.

Mais l'observation microscopique, quand on fait usage de forts grossissements, exige des lames suffisamment transparentes pour pouvoir être éclairées par transmission. Lorsque ces lames cristallines ne sont pas directement fournies par le clivage, on les obtient en détachant du cristal une esquille et en la polissant à l'émeri sur une meule horizontale. Dès qu'on a obtenu une face bien plane, on la colle, avec du baume de Canada, sur une plaque de verre épais et on procède, ainsi qu'il a déjà été dit, au polissage d'une autre face parallèle à la première. On peut ainsi, quand on en a l'habitude, obtenir des plaques extrêmement minces, comme cela est nécessaire si le minéral est très peu transparent ou si l'on y veut étudier les phénomènes chromatiques. Les lames minces doivent d'ailleurs être collées, avec les précautions voulues, entre deux plaques de verre, à l'aide du baume de Canada.

De tous les phénomènes que le microscope permet de constater, l'un des plus importants est la présence, au sein des cristaux, de matières étrangères à l'état d'*inclusions*. On en distingue de plusieurs sortes, suivant qu'elles sont gazeuses, vitreuses, liquides ou solides.

Inclusions vitreuses et gazeuses des cristaux. — Les inclusions vitreuses (fig. 359) sont les restes de la matière amorphe au sein de laquelle les cristaux ont pris naissance; elles sont nécessairement isotropes. Leur coloration est généralement brune, violacée ou rougeâtre, tandis que les inclusions fluides sont incolores. Comme il y a d'ordinaire une grande différence entre l'indice de réfraction du cristal et celui de l'inclusion, les contours de cette dernière sont nets et dépourvus de pénombre. Les bulles qu'elle peut contenir, et qui ont dû être produites par des gaz entraînés avec la pâte vitreuse, sont immobiles et à contours fortement ombrés.

Quelquefois les inclusions vitreuses, au lieu d'être arrondies, occupent une cavité à contours polyédriques; mais on les distingue aisément des petits cristaux qui pourraient être enclavés dans un plus grand, parce que leur forme polyédrique est *celle qui convient au corps enveloppant*. Les inclusions de cette nature forment donc, au sein de la masse qui les contient, ce qu'on appelle un cristal *négatif* ou en creux.



Fig. 359. — Inclusions vitreuses (d'après *Zirkel*).

Les cristaux négatifs sont assez fréquents dans le Quartz, dans le Sel gemme, ainsi que dans la Glace et le Gypse.

Les inclusions gazeuses, le plus souvent arrondies, peuvent aussi occuper un cristal négatif. Leur contour est limité par une large bande noire, à cause de la différence de réfrangibilité qui existe entre le gaz de l'inclusion et la matière qui l'environne, d'où résultent des réflexions totales. Le gaz qui s'y trouve renfermé, la plupart du temps sous faible pression,

consiste en général en azote, avec traces d'oxygène et d'acide carbonique. Quand la pression est un peu élevée, on observe ordinairement de l'acide carbonique, de l'hydrogène et des hydrocarbures.

Inclusions liquides. — Les inclusions liquides ont des formes, tantôt irrégulières, tantôt polyédriques. La pénombre de leur contour est plus accentuée que celle des inclusions gazeuses, parce qu'il y a moins de différence entre l'indice de réfraction du cristal et celui du liquide enveloppé. La plupart contiennent une bulle de gaz ou *libelle*, à contour fortement ombré (fig. 360).



Fig. 360. — Inclusions liquides avec libelles (d'après *Zirkel*).

Dans le Quartz, qui de tous les minéraux en est le plus abondamment pourvu, les inclusions s'alignent en traînées plus ou moins tortueuses. En général, le maximum de leur diamètre est $6^{mm},06$; les plus petites ne sont visibles qu'avec un grossissement de 700 ou 800 diamètres. On compte parfois dans cette espèce plus de 120 inclusions sur un centième de millimètre carré. M. Zirkel en a observé dont le diamètre était inférieur à 3 millionièmes de millimètre.

La bulle mobile ou *libelle* est le caractère distinctif des inclusions liquides, bien que parfois elle puisse faire défaut. Toutes les fois que sa dimension est inférieure à 2 millièmes de millimètre, cette libelle est animée d'une trépidation constante, dont la cause paraît devoir être cherchée dans les phénomènes de la thermodynamique (1).

Parmi les liquides des inclusions, les uns possèdent la transparence, la réfrangibilité et la dilatabilité de l'eau ; ce sont ou de l'eau pure, ou des dissolutions salines aqueuses. D'autres sont légèrement jaunâtres ou verdâtres, moins réfringents que l'eau, beaucoup plus dilatables et très volatils. Vogelsang a imaginé d'ingénieux appareils pour étudier l'action de la chaleur sur les liquides des inclusions. On voit tantôt le liquide se dilater en absorbant la libelle, sauf à se réduire peu après lui-même en vapeur, ce qu'on reconnaît à l'apparition d'une forte pénombre ; tantôt la libelle augmenter progressivement aux dépens du liquide qui se vaporise.

Beaucoup d'inclusions renferment de l'acide carbonique liquide. La plupart donnent des traces nettes de chlore et parfois même de fluor ; ce dernier cas se présente, non seulement avec les minéraux fluorés tels que la Topaze, mais encore avec le Quartz de la plupart des granites. Le chlore et le fluor des inclusions paraissent être à l'état de chlorure de sodium, de fluorure de calcium et de fluorures alcalins.

Souvent, du reste, des cristaux cubiques s'observent dans les inclusions liquides (fig. 361), par exemple dans le Quartz de la Syénite zirconienne de Laurvig et dans la Néphéline des blocs rejetés de la Somma, au Vésuve.

(1) Voir, dans notre *Traité de Géologie*, 5e édit., p. 609, l'explication proposée par les PP. Carbonnelle et Thirion.

M. Sorby a vu plusieurs de ces cubes, contenus dans une même inclusion, se redissoudre sous l'action de la chaleur, pour se reconstituer ensuite par le refroidissement, mais cette fois en un cristal unique ; c'était du chlorure de sodium, en quantité quatre fois supérieure à ce que l'eau en peut dissoudre à 100°. Ce sel est de beaucoup le plus fréquent et on en démontre directement l'existence par le précipité blanc, soluble dans l'ammoniaque, que donne, avec le nitrate d'argent, la liqueur obtenue par le lavage des cristaux à inclusions, préalablement réduits en poudre.

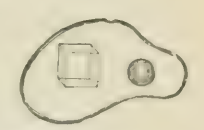


Fig. 361. — Inclusion liquide avec cristal cubique (d'après Zirkel).

Avec le chlorure de sodium, on constate, dans les solutions, la présence de sulfates et de carbonates alcalins ; quelquefois il s'y trouve des cristaux de fluorine et même du sulfate de baryte.

En cherchant à évaluer, par des expériences de dilatabilité, la température et la pression sous l'empire desquelles avait dû se dissoudre le sel marin contenu dans les inclusions liquides du quartz des porphyrites de Quenast, MM. Renard et de Lavallée-Poussin sont arrivés aux chiffres de 307 degrés et de 87 atmosphères. De son côté, M. Sorby a évalué à 356 degrés la température à laquelle s'était vraisemblablement consolidé le quartz du trachyte des îles Ponza.

Microlithes. Disposition des inclusions. — Les inclusions solides consistent en cristaux microscopiques, mais spécifiés et souvent reconnaissables à leurs formes cristallines, auxquels on donne le nom de *microlithes*. Quelquefois un cristal de dimensions notables se montre entièrement constitué par un agrégat de microlithes de la même espèce, comme le cristal de Hornblende de la figure 362. D'autres fois les microlithes, spécifiquement distincts du cristal qui les englobe, sont disposés dans l'intérieur d'une manière plus ou moins capricieuse.

Les microlithes ont été souvent désignés sous les noms de *parasites*. Il arrive quelquefois qu'ils sont tous orientés d'une manière régulière au milieu du cristal qui les contient et qu'on appelle leur *hôte*. Certaines espèces, telles que la Staurotide, renferment, d'une manière constante, une telle quantité de microlithes, qu'il est impossible d'en obtenir avec exactitude la véritable composition chimique, faute de pouvoir opérer sur une variété pure. C'est du reste un soin qu'il ne faut jamais oublier, de faire l'analyse d'un minéral sur des échantillons aussi exempts que possible d'inclusions étrangères.



Fig. 362. — Cristal de Hornblende formé de microlithes (d'après Zirkel).

La disposition des inclusions à l'intérieur des cristaux laisse voir fréquemment un arrangement concentrique qui témoigne, soit de phases distinctes dans la formation du cristal, soit de phénomènes de concentration spéciaux,

qui se sont passés dans sa masse. La figure 363 montre des inclusions vitreuses accumulées au centre d'un cristal, tandis que, dans la figure 364, elles sont réparties en deux zones, parallèlement aux côtés et que, dans la figure 365, les deux modes d'arrangement sont réalisés ensemble.

La disposition régulière des microlithes est surtout visible dans les gros

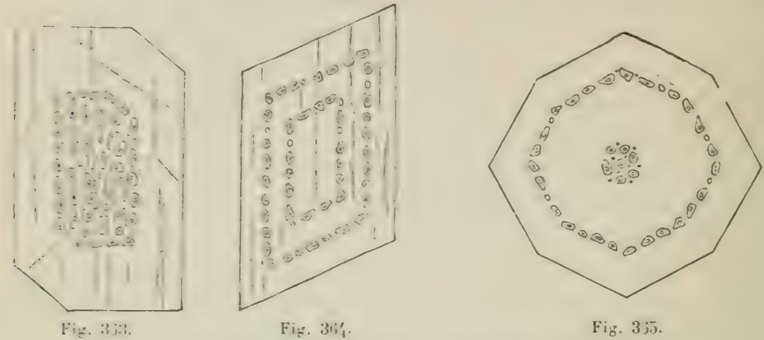


Fig. 363. Fig. 364. Fig. 365.
Exemples de disposition des inclusions dans les cristaux (d'après *Zirkel*).

cristaux de Leucite, où leur arrangement peut se faire par zones concentriques (fig. 366 et 367) ou par secteurs rayonnant à partir du centre (fig. 368).

Il arrive quelquefois que la succession des zones concentriques à l'intérieur des cristaux s'accuse par une différence marquée dans la cohésion. Par

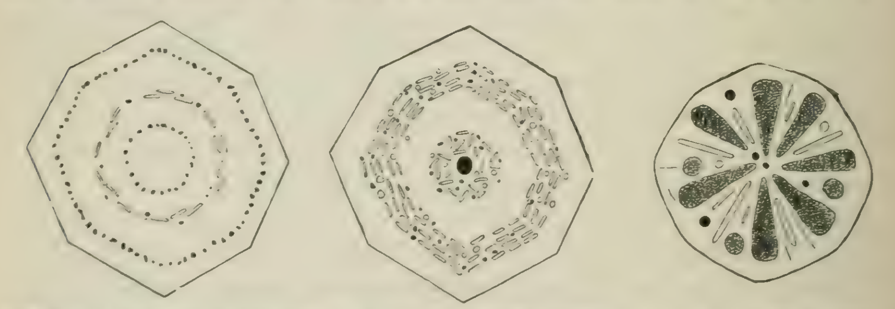


Fig. 366. — Leucite avec microlithes du basalte de Stolpen (d'après *Zirkel*). Fig. 367. — Leucite avec microlithes du basalte de Schlachau (d'après *Zirkel*). Fig. 368. — Leucite du Vésuve (d'après *Zirkel*).

exemple on connaît de gros cristaux de quartz, formés de prismes pyramidés qui s'emboîtent exactement les uns dans les autres, chaque individu plus gros servant en quelque sorte de cristal négatif à celui qu'il recouvre. Les divers cristaux composants peuvent être facilement isolés ou remis en place et l'on constate généralement, sur leurs faces, un enduit de lamelles de mica, qui explique cette interruption périodique de la cohésion.

Squelettes de cristaux. Cristaux-enveloppes. — L'observation montre que beaucoup de cristaux se sont développés d'abord suivant certaines directions privilégiées, passant par le centre, de sorte que les arêtes seules de la

forme cristalline sont bien constituées. Sur les faces, la cristallisation a marché moins vite et il en résulte des dépressions, parfois en forme d'entonnoirs ou de trémies, donnant naissance à ce qu'on appelle des *squelettes de cristaux*. Ainsi les octaèdres de Cuprite sont souvent réduits à leurs arêtes et à leurs plans principaux, les faces étant restées creuses et comme corrodées.

Plus souvent encore la matière cristallisable semble s'être portée de préférence à la périphérie, de manière à constituer un cristal aussi gros que possible, dont l'intérieur est demeuré vide ou s'est rempli de matières étrangères. Ainsi les gros dodécaèdres de Grenat des chloritoschistes consistent fréquemment en une simple pellicule, tout l'intérieur étant rempli de chlorite et, dans ce cas, l'impureté des cristaux contraste d'une façon remarquable avec la dimension et la régularité de leur forme extérieure. La même chose arrive aux octaèdres de Magnétite disséminés dans les schistes. D'autres fois, le Grenat ou l'Idocrase forment une couche mince cristallisée, entourant un noyau constitué par un mélange de calcite avec l'un de ces minéraux (*Périmorphose* de Scheerer).

C'est probablement à un phénomène de cet ordre qu'il faut attribuer ce qu'on appelle le *grès cristallisé* de la forêt de Fontainebleau. Ce sont des rhomboèdres assez gros et groupés, ayant exactement les formes de la calcite, mais dont l'intérieur est surtout constitué par du grès siliceux à ciment calcaire. Il semble donc que le carbonate de chaux ait cherché à cristalliser sous la plus grande dimension possible, se contentant, pour remplir l'intérieur, des grains de sable quartzeux qu'il servait à agglutiner.

Les *cristaux-enveloppes* sont un phénomène très fréquent. Nous avons déjà parlé des prismes pyramidés de Quartz, qui s'emboîtent les uns dans les autres. Souvent un gros prisme de Quartz se montre, à l'une de ses extrémités, sous la forme d'un cristal unique, avec pyramide terminale bien développée, tandis que, à l'autre extrémité, on voit apparaître une foule de prismes pyramidés distincts, tous orientés de la même manière. Quelquefois même, sur chacun de ces prismes, une des faces pyramidales est disposée de telle façon que toutes les faces homologues se trouvent dans le même plan, ce qui explique qu'elles puissent en arriver à se confondre en une face unique.

Du reste, ce fait est assez général pour que M. Sadebeck ait conçu, sous le nom de Cristallotectonique, une doctrine d'après laquelle tout cristal est formé d'une agglomération de *sous-individus*. Ces éléments pourraient être plus ou moins simples, et tantôt leur forme serait concordante avec celle de l'individu total, tantôt elle serait plus compliquée. Lorsque quelques-uns des sous-individus prennent, dans une direction, un développement plus rapide que le reste du cristal, ce dernier ne se termine pas de ce côté par des faces planes.

Orientation par influence. — En tout cas, quelles qu'aient été les particularités de la cristallisation, deux choses ressortent clairement de l'observation : d'une part, la tendance à l'orientation identique des éléments contigus,

même quand ils restent distincts; d'autre part, la fréquence des formes enveloppes, qui tendent à englober, sous une même et unique surface, soit plusieurs individus séparés, soit une partie cristalline et un remplissage de nature quelconque.

L'influence des éléments déjà consolidés sur l'orientation des particules en voie de cristallisation est si nettement marquée, qu'elle se manifeste même sur des cristaux dont les dates de formation diffèrent beaucoup. Ainsi, dans les porphyres, on constate par les observations chromatiques que, très souvent, les petits individus quartzeux de la pâte ont pris l'orientation des gros cristaux de quartz ancien, autour desquels ils sont venus former comme une auréole. De même on a remarqué que les grains de glace des glaciers, augmentant peu à peu de grosseur par la congélation de l'eau qui les imbibe, peuvent finir par donner lieu à des individus beaucoup plus gros, d'orientation uniforme.

Le fait n'a rien qui doive surprendre; car l'adjonction d'éléments nouveaux replace la périphérie des cristaux anciens dans des conditions analogues à celles de leur formation, et il est naturel que l'unité primitive du réseau tende à se reconstituer. Nous avons vu d'ailleurs que, si elle n'y parvient pas, du moins les réseaux juxtaposés s'influencent réciproquement, suivant les lois qui président aux macles.

Ajoutons qu'il n'est pas rare de voir deux espèces distinctes s'orienter d'une manière définie l'une par rapport à l'autre. Ainsi, en Bohême, la Pyrite jaune cubique a cristallisé en même temps que la Marcasite rhombique, et tandis qu'une des faces cubiques de la première espèce s'appliquait exactement sur une face *p* de la seconde, une autre face cubique prenait la direction de l'une des faces *m* de la Marcasite. Souvent aussi, sur des cristaux d'Albite, on voit de petits cristaux d'Adulaire implantés parallèlement les uns aux autres. Enfin c'est une particularité des cristaux de Staurotide du Saint-Gothard, qu'une de leurs faces se dispose exactement dans le prolongement d'une face d'un cristal de Disthène.

Cristaux à faces courbes. Cristallites. — Pour terminer l'énumération des particularités de la structure cristalline, il convient de mentionner la fréquence des faces courbes. Il y a des espèces, comme le Diamant, où le fait est général, en sorte que les cristaux à faces courbes y sont plus nombreux que les autres. Dans une tout autre série de minéraux, la Dolomie est remarquable par la courbure habituelle des faces de ses rhomboèdres, ce qui, du reste, n'influe pas sur le tranchant des arêtes. Le même phénomène se présente dans les faces verticales des prismes de Tourmaline, comme dans celles du Béryl ou Aigue-Marine et parfois de la Topaze; enfin il est très fréquent dans les cristaux de Gypse.

La plupart du temps, ce phénomène doit être attribué à la juxtaposition d'une série très nombreuse de facettes, faisant partie de la même zone. Ainsi la

surface des octaèdres courbes de Diamant montre un grand nombre de stries parallèles, dessinant des pyramides triangulaires de plus en plus surbaissées. De même le grand nombre des stries sur les prismes de Tourmaline et de Béryl indique une succession de prismes hexagonaux ou dodécagonaux. Mais il est douteux que la même explication convienne au cas des cristaux de Pyroxène, d'Amphibole et d'Apatite qu'on observe dans certains calcaires cristallins, où leur surface est comme fondue et offre une courbure tout à fait irrégulière.

Dans les minéraux de nature vitreuse, tels que l'Obsidienne, on rencontre souvent, sous la forme d'aiguilles, de globules et d'arborisations microscopiques dites *cristallites*, des indices de dévitrification donnant naissance, non à des cristaux réellement spécifiés, mais à des corpuscules qui tiennent le milieu entre l'état cristallin et l'état amorphe.

§ 2

EXPÉRIENCES RELATIVES A LA CRISTALLISATION

Circonstances de la cristallisation. — L'expérience enseigne que les cristaux se forment lorsqu'une substance prend l'état solide d'une manière lente et à l'abri des causes extérieures de perturbation. Dans ces conditions, les individus cristallins sont nettement délimités et peuvent atteindre d'assez grandes dimensions. Si le passage à l'état solide est trop brusque, la masse offre l'aspect d'une poussière cristalline microscopique agglutinée. Tantôt les axes des cristaux infiniment petits s'orientent et il en résulte un agrégat cristallin *fibreux*; tantôt il n'y a aucun indice d'orientation et l'on peut dire que le corps est *amorphe*, bien que cela ne soit pas vrai dans le sens rigoureux du mot; car si petits que soient les grains cristallins, il est probable que chacun d'eux dépasse de beaucoup les dimensions de la particule et possède, par conséquent, une structure régulière, produite par l'alignement en réseau d'un certain nombre de polyèdres particulaires. Seuls, certains corps, qu'on appelle *colloïdes*, paraissent absolument réfractaires à la cristallisation, et cela dans toutes les circonstances connues. Ceux-là donc sont seuls véritablement amorphes, c'est-à-dire dépourvus de structure. Néanmoins on a pris l'habitude de qualifier de variétés amorphes les variétés d'un corps où la cristallisation porte sur des éléments si petits, que les phénomènes ordinaires des cristaux ne s'y manifestent pas.

Cela posé, la cristallisation peut se faire de trois manières : 1° par le passage de l'état gazeux à l'état solide, qu'on appelle *sublimation* quand il se produit sous l'influence d'une température élevée; 2° par refroidissement lent après fusion ignée; 3° par voie humide, lorsqu'une dissolution arrive à saturation.

De nombreux essais de synthèse ont été entrepris dans ces dernières années et ont permis de mieux connaître les diverses circonstances de la cristallisation.

Classification des méthodes de reproduction artificielle. — Dans leur ouvrage sur la reproduction artificielle des minéraux (1), MM. Fouqué et Michel-Lévy ont donné, des procédés de synthèse jusqu'ici employés, la classification suivante :

I. *Modifications moléculaires éprouvées par le corps à l'état solide : A. Sans réaction chimique* (soufre, acide arsénieux, fer).

B. Avec réactions chimiques (intervention des minéralisateurs gazeux, comme dans l'expérience de Hall, où le carbonate de chaux se décompose en partie et cristallise de nouveau sous l'influence de l'acide carbonique en tension).

II. *Modifications moléculaires de corps fondus : A. Sans réactions chimiques.* 1° *sans dissolvant* (cristallisation après fusion du soufre, du bismuth, du péridot, etc.; refroidissement lent et en plusieurs temps des éléments de la leucite, avec formation successive de globulites, de cristallites, enfin de microlithes).

2° *avec dissolvant* (cristallisation de l'apatite dans les chlorures, du graphite dans la fonte de fer, etc.).

B. Avec réactions chimiques (production de l'orthose, de l'albite, du quartz, etc., par M. Hautefeuille, à l'aide des tungstates et vanadates alcalins).

III. *Modifications moléculaires de corps volatilisés : A. Volatilisation proprement dite* (soufre, arsenic, blende, cette dernière plus facilement sublimée dans une atmosphère inerte d'azote).

B. Volatilisation avec réactions chimiques : 1° *actions réciproques des gaz et des vapeurs* (production de l'oligiste par le perchlorure de fer et la vapeur d'eau; des sulfures par l'action de l'hydrogène sulfuré sur les chlorures).

2° *action d'une vapeur ou d'un gaz sur un solide* (production de l'argent filiforme par l'hydrogène et le sulfure d'argent; du fer oxydulé, du corindon, du zircon, du silicate d'alumine, par les minéralisateurs gazeux, hydrogène, acide carbonique, etc., méthode de Henri Sainte-Claire Deville).

IV. *Modifications moléculaires de corps dissous dans l'eau : A. Sous pression ordinaire* : 1° *par évaporation ou volatilisation* (chlorures alcalins, gypse).

2° *dans une dissolution sursaturée* (procédé de M. Gernez).

3° *avec variations dans la température* (cristallisation progressive et croissante du chlorure d'argent en poudre dans l'eau, soumise à des variations multiples entre 0° et 100°).

4° *avec réactions chimiques* (précipitation, par double décomposition ou par dissociation, de la calcite, de l'aragonite; emploi de liquides très dilués et mis progressivement en contact).

B. Par l'emploi de l'eau sous haute pression (reproduction, en vase clos, de la plupart des minéraux des filons, par Sénarmont, Daubrée, MM. Ch. Friedel et Sarasin).

V. *Combinaisons des méthodes précédentes.*

(1) *Synthèse des minéraux et des roches*, Paris, 1882.

On trouvera d'ailleurs, dans l'ouvrage déjà cité de MM. Fouqué et Michel-Lévy, les détails les plus complets sur les essais dont chaque espèce minérale a été jusqu'ici l'objet. Nous nous bornerons à mentionner quelques-uns des principaux résultats obtenus.

Expériences diverses par voie sèche. — Le procédé de cristallisation par voie sèche a été employé avec succès, par divers savants, à la reproduction artificielle des minéraux cristallisés ; mais généralement on a dû faire intervenir des vapeurs capables de réagir les unes sur les autres à une haute température. Ainsi Daubrée a préparé les oxydes d'étain et de titane par la réaction de la vapeur d'eau sur les vapeurs des perchlorures de ces deux corps. En substituant les fluorures aux chlorures, M. Hautefeuille a obtenu, à des températures croissantes, l'Anatase, puis la Brookite, enfin le Rutile.

Antérieurement, Durocher avait préparé des sulfures métalliques par la réaction de l'hydrogène sulfuré sur des chlorures métalliques gazeux et Daubrée avait obtenu un bon nombre de minéraux par l'action de vapeurs, par exemple la vapeur de chlorure de silicium, sur des bases fixes, chaux, magnésie, etc. Le sesquioxyde de fer cristallisé a été produit par Henri Sainte-Claire Deville à l'aide d'un courant d'acide chlorhydrique agissant sur du peroxyde de fer, et le même savant a obtenu le sulfure de zinc hexagonal par le passage de l'hydrogène gazeux sur le sulfure de zinc amorphe.

Les cristaux qu'on obtient par ces procédés sont en général très petits ; mais on peut en augmenter le volume en prolongeant les réactions. En effet, on a remarqué que, dans les fumerolles volcaniques, le chlorure de fer qui se dégage, en même temps que la vapeur d'eau, laisse déposer, à droite et à gauche de la fissure, une poussière rouge de peroxyde de fer amorphe. Mais, dans la fissure même, le passage répété des vapeurs, sur le peroxyde produit, *nourrit* en quelque sorte les cristaux et il s'y développe de véritables lamelles de Fer oligiste.

Fusion ignée. — Tout le monde connaît la cristallisation du bismuth et celle du soufre par fusion. Le second de ces deux corps donne, en se refroidissant, des aiguilles monocliniques, implantées sur les parois du récipient. Mais ces aiguilles sont instables et se transforment rapidement à l'air en octaèdres rhombiques. Cette dernière forme est d'ailleurs la seule sous laquelle le soufre soit connu à l'état natif.

La cristallisation par fusion et refroidissement lent a été surtout étudiée dans les expériences de MM. Fouqué et Michel-Lévy. Mais, en général, ces expériences n'ont pas été appliquées à des espèces minérales simples ; elles ont porté sur des mélanges offrant la composition des roches éruptives, dont les auteurs se proposaient l'imitation artificielle. Elles ont fait ressortir ce fait intéressant, que la nature et le développement des cristaux qui se produisent sont considérablement influencés par les circonstances du refroidissement. Si ce dernier est conduit de manière à offrir plusieurs périodes, caractérisées

chacune par le maintien prolongé d'une température déterminée, à chacun de ces stades correspondent des cristaux spéciaux.

Emploi des dissolvants à haute température. Expériences diverses. — Une méthode employée avec succès par Ebelmen est celle qui consiste à dissoudre la substance cristallisable dans un réactif susceptible de s'évaporer à une haute température. Des cristaux d'Olivine et de Perowskite ont été obtenus par la fusion, dans un four à porcelaine, d'un mélange comprenant les éléments chimiques de ces minéraux, dissous dans l'acide borique. Forchhammer, en employant le chlorure de sodium comme dissolvant, a pu préparer des cristaux d'Apatite. Entre les mains de M. Hautefeuille, l'emploi du tungstate de soude a permis d'obtenir l'Orthose, l'Albite, le Quartz, la Tridymite.

Le grand intérêt de ces dernières recherches est qu'elles semblent se rapprocher beaucoup des conditions de la cristallisation naturelle. En effet, de ce qu'un minéral a été obtenu, dans un laboratoire, par tel ou tel procédé, il n'y a encore rien à conclure quant à la manière dont la même espèce a pu se former dans l'écorce du globe. Pour qu'une induction soit légitime, il faut que l'expérience ait réalisé des circonstances analogues à celles que laisse présumer l'examen des gisements. Un minéral ne se présente pas seul ; il est associé à d'autres espèces qui souvent ont dû cristalliser au même moment, et dont la composition permet de se rendre compte de la nature du milieu au sein duquel la cristallisation s'est accomplie. Lorsque, par exemple, on voit les cristaux de Cassitérite et ceux d'Émeraude se pénétrer mutuellement, on est en droit d'admettre qu'ils se sont formés ensemble et, comme l'observation montre que le cortège normal du minerai d'étain se compose en grande partie de minéraux fluorés, on en doit conclure que les composés du fluor ont vraisemblablement joué, dans la cristallisation de la Cassitérite comme dans celle de l'Émeraude, le rôle de dissolvants. Un essai de reproduction où l'on ferait intervenir le fluor ne serait donc pas seulement une expérience de laboratoire. Ce serait aussi une tentative de reconstitution d'un ensemble remarquable de circonstances naturelles.

Ajoutons que la pression a probablement joué un rôle important dans la formation des cristaux. Cette induction semble confirmée par diverses expériences de laboratoire. Ainsi Sénarmont avait obtenu du Quartz cristallisé en chauffant sous pression, à 350 degrés, un mélange de silice gélatineuse et d'eau chargée d'acide chlorhydrique. De même, en opérant dans des tubes de verre hermétiquement clos, renfermés dans des tubes en fer et chauffés à 400 degrés, Daubrée a constaté que l'eau attaquait le silicate du verre et qu'il se produisait des cristaux microscopiques de Quartz. C'est encore sous pression et à la température de 400 degrés que, par l'action d'un mélange d'alumine et de potasse avec un grand excès de silice gélatineuse, MM. Friedel et Sarasin ont obtenu du Quartz en petits cristaux bipyramidés.

Production de cristaux par des actions lentes. — Mais ni la pression

ni la température ne sont indispensables à la cristallisation, et il est des cas où ce phénomène se produit par l'action, longtemps prolongée, d'eaux minérales naturelles sur les terrains encaissants ou sur des constructions faites de main d'homme. C'est ce qui résulte des études de Daubrée (1) sur les eaux de Plombières et de Bourbonne-les-Bains.

Les eaux de Plombières, qui contiennent surtout du silicate de potasse avec un peu de fluorure de calcium, ont transformé à la longue le ciment calcaire et même les briques du béton, que les Romains avaient répandu aux abords des points d'émergence. Ainsi se sont formées des zéolites, parmi lesquelles l'Apophyllite, la Chabasie et la Christianite; avec ces minéraux on a trouvé l'Opale, la Fluorine, l'Halloysite. Tout cela s'est fait sous la simple pression atmosphérique et à une température inférieure à 70 degrés.

La localisation des produits est très marquée; l'Apophyllite ne se trouve que dans la chaux et la Chabasie que dans la brique. Il n'y a pas eu dissolution dans l'eau des minéraux en question, mais les espèces nouvelles se sont produites sur place, par adjonction de l'alcali des eaux à la substance des briques ou du ciment.

A Bourbonne-les-Bains, des eaux contenant des chlorures et des sulfates d'alcalis, de chaux et de magnésie, ont traversé, pendant des siècles, un puisard romain où de nombreuses médailles de bronze gisaient dans une vase riche en matières organiques. Les sulfates, réduits par ces matières à l'état de sulfures, ont agi sur les médailles, qu'on a retrouvées couvertes de minéraux cristallisés, cuivre sulfuré, cuivre panaché, cuivre gris, cuivre oxydulé, plomb sulfuré, pyrite de fer, tandis que des zéolites, de l'Aragonite et de la Calcite, se formaient dans les cavités des briques du béton.

Là encore, la température ne dépassait pas 68 degrés, et l'action s'est accomplie à huit mètres seulement de la surface; mais elle s'est répétée sans discontinuité pendant de longs siècles, et ainsi les espèces formées ont pu revêtir la forme cristalline.

Dissolutions saturées. Mode d'accroissement des cristaux. — Les dissolutions saturées qui peuvent cristalliser facilement à froid offrent un moyen excellent, bien que restreint à un petit nombre d'espèces, d'étudier les diverses particularités de la formation des cristaux et d'en suivre les progrès.

Une dissolution cristallise lorsqu'elle est amenée, par évaporation, à l'état de sursaturation. Plus l'évaporation est lente et mieux les cristaux sont formés; en opérant brusquement, on n'obtient qu'une cristallisation confuse. C'est ainsi qu'on peut avoir de gros cristaux de soufre en laissant évaporer très lentement, dans une cave, une dissolution de soufre dans le sulfure de carbone.

En choisissant un cristal qui vient de se former et en le portant dans une dissolution saturée de la même substance ou d'*une substance isomorphe*, on voit

(1) *Études synthétiques de géologie expérimentale*, pp. 72, 180.

le cristal grossir peu à peu; c'est ce qu'on appelle *nourrir* le cristal. Un individu bien développé est donc prédestiné à devenir un centre de cristallisation, qui non seulement détermine le dépôt des particules à sa surface, mais influe sur leur orientation, en la rendant identique avec celle des particules antérieurement consolidées et en les obligeant à s'aligner sur le même réseau.

On peut, par ce procédé, obtenir des cristaux beaucoup plus gros et beaucoup plus purs que les cristaux naturels. Mais il n'y a qu'un petit nombre d'espèces qui se prêtent à ce mode d'expérimentation. Suivant une ingénieuse comparaison de M. Tschermak (1), il en est de la cristallisation artificielle comme de l'horticulture, qui parvient, mais en opérant sur un nombre limité d'espèces végétales, à obtenir des produits supérieurs en beauté à ceux qui croissent librement. Les cristaux qui se forment dans une dissolution saturée se déposent au fond du vase et se groupent ainsi les uns sur les autres. Pour avoir des cristaux uniques, il faut, ou bien suspendre l'individu qu'on veut nourrir avec un fil très fin, même un cheveu, ou bien introduire dans la dissolution un corps gélatineux, tel que de la colle, au milieu duquel les cristaux puissent nager. C'est ainsi que, dans la nature, les cristaux libres, terminés de tous côtés, sont ceux qu'on recueille dans des argiles, c'est-à-dire au milieu d'anciennes boues qui ont dû les tenir en suspension.

Tel est le cas de beaucoup de cristaux de pyrite et de certaines variétés de quartz bipyramidé.

Cicatrisation des cristaux. Influence des eaux-mères. — Lorsqu'on prend un petit cristal et que, sans le briser, on s'en sert comme de noyau d'accroissement au bout de quelque temps on obtient un assez gros cristal, exactement semblable au noyau et orienté comme lui. Mais cela ne dépend pas de la forme même de ce noyau, car ce dernier peut être brisé irrégulièrement et l'un de ses fragments, employé seul, reproduira par accroissement un cristal identique avec celui de la précédente expérience. Le noyau n'agit donc que comme élément d'attraction et d'orientation.

Les expériences de M. Levalle et celles de Pasteur ont montré de quelle manière un cristal artificiellement brisé pouvait réparer ses plaies, quand on le replongeait dans le liquide saturé qui lui avait donné naissance. Cette réparation marche généralement avec une grande rapidité et ce n'est que quand elle est achevée que l'accroissement du cristal reprend son cours régulier. De plus, Pasteur a démontré que la rapidité d'accroissement du cristal différait suivant les directions, gardant, pour deux directions données, un rapport constant, d'où il est permis de conclure que la production des diverses faces qui limitent un cristal est causée par les vitesses différentes avec lesquelles, suivant les directions, le cristal s'accroît dans l'eau-mère. Toute cause qui modifie le rapport de ces vitesses, par exemple l'introduction, dans l'eau-mère, de cer-

(1) *Lehrbuch der Mineralogie*, p. 15.

taines matières étrangères, influe sur le choix des formes simples appelées à concourir à la délimitation du cristal.

Ainsi l'alun purifié se présente en octaèdres avec les faces, peu développées, du rhombododécaèdre b^1. L'addition de phosphate ou de nitrate de soude fait disparaître b^1. Celle de nitrate de cuivre donne des cubo-octaèdres. L'intervention de l'acide chlorhydrique amène, sur ces derniers, l'apparition du dodécaèdre pentagonal. Mais cette influence ne se produit que par l'addition de substances dissoutes; le mélange de poussières solides se montre à cet égard sans action; le cristal se contente d'en englober une partie dans sa masse.

Lorsqu'une liqueur saturée dépose des cristaux, sa composition change par le fait même de ce dépôt, et, si le liquide n'est pas en très grand excès relativement à la masse des cristaux formés, ce changement de milieu se traduit par une altération de la forme qui avait d'abord pris naissance. Les angles se modifient légèrement : des macles se forment, accusées au moins par des stries; en un mot les cristaux perdent leur homogénéité. Lors donc qu'on veut les avoir très purs et de caractères géométriques très constants, il faut s'arranger de manière à n'obtenir que de petits cristaux, déposés en petit nombre au sein d'un notable excès de la liqueur mère.

Cette influence des milieux rend bien compte des petites différences (portant sur les minutes) qu'on observe entre les cristaux de diverses provenances d'une même espèce minérale.

Sursaturation. — Quand une dissolution est susceptible de se sursaturer, c'est-à-dire quand on peut, à l'abri de toute agitation, l'amener à une température sensiblement inférieure à celle de la saturation, la cristallisation immédiate du sel en excès peut être provoquée par le contact de certains corps. Les expériences de M. Gernez ont montré que le résultat pouvait dépendre du corps employé. Ainsi une dissolution sursaturée de soufre donne, au contact d'un cristal octaédrique, une cristallisation en octaèdres. Si l'on emploie des prismes, la liqueur cristallise en prismes; mais ces prismes, touchés avec un octaèdre, se transforment en chapelets d'octaèdres.

L'étude des dissolutions sursaturées offre un grand intérêt; car elle semble se rapprocher, mieux que tout autre mode opératoire, des conditions qui ont dû présider à la formation des cristaux naturels. M. Lecoq de Boisbaudran a développé à cet égard d'ingénieuses considérations (1), par lesquelles il a cherché à expliquer la production des facettes secondaires. Dans une liqueur notablement sursaturée, certaines directions de faces peuvent s'accroître très rapidement, par dépôt de couches successives, et perdre ainsi en surface. Mais, la sursaturation diminuant, le privilège de l'accroissement rapide peut passer à d'autres faces et, à partir de ce moment, la forme du cristal commence à se modifier. Cette nouvelle phase ne se produit que quand le degré de sursaturation

(1) *Comptes rendus*, LXXIX, pp. 802, 866.

est devenu assez petit pour permettre la manifestation des différences de stabilité, d'ailleurs très faibles, qui distinguent les divers systèmes de faces.

Le même auteur a fait remarquer que, suivant les directions de rapide accroissement, les particules ont évidemment à satisfaire à un moins grand nombre de conditions pour se fixer. Leur position est donc, en général, moins assurée que quand un ensemble plus complexe de conditions détermine un accroissement plus lent, mais en garantissant à l'édifice une solidité supérieure, accusée par un dégagement de chaleur plus considérable pendant la cristallisation.

Influence de la température. Cristaux doués du pouvoir rotatoire. — La température influe, comme on peut le prévoir, d'une manière considérable sur la production des cristaux. L'alun, octaédrique à la température ordinaire, donne, en vases clos et au-dessus de 100 degrés, des rhombododécaèdres ou des trapézoèdres. Dans les circonstances usuelles, l'acide carbonique, passant dans l'eau de chaux, fait naître des cristaux microscopiques de Calcite rhomboédrique. A 100 degrés, c'est de l'Aragonite qui prend naissance. A 70 degrés, les deux variétés sont mélangées. Enfin les expériences déjà citées de M. Hautefeuille montrent que la production des trois espèces de l'acide titanique est déterminée par le degré de la température.

Parmi les substances douées du pouvoir rotatoire, il en est, comme le quartz, le chlorate de soude et le formiate de strontiane, où cette propriété n'existe que chez les cristaux formés, tandis qu'elle disparaît dans les dissolutions. Pasteur a montré que la cristallisation de ces substances donnait toujours *à la fois* des cristaux gauches et des cristaux droits, même quand on se servait de dissolutions exclusivement faites avec l'une des deux catégories de cristaux.

Les autres corps capables de dévier le plan de polarisation, tels que l'acide tartrique et les tartrates, également étudiés par Pasteur, doivent probablement cette faculté à la structure même de leur particule cristalline; car ils la conservent en dissolution. Il paraît y avoir chez ces corps quatre manières d'être, sur la production desquelles influent la température et la quantité d'eau ajoutée : dans l'une d'elles les cristaux sont droits; dans une autre, ils sont gauches; dans une troisième, on obtient des cristaux holoédriques; enfin la quatrième fournit également des cristaux holoédriques, mais peut se dédoubler, par l'action de la chaleur, en se partageant entre les deux premiers modes.

Sphérolithes à enroulement hélicoïdal. — Beaucoup de corps, cristallisant rapidement et incomplètement, se prennent en sphérolithes, formés de fibres divergeant d'un même centre, et pouvant d'autre part, avec leur structure radiée, combiner une structure concentrique.

Pour la calcédoine, où ce phénomène est fréquent, MM. Michel Lévy et Munier-Chalmas ont montré (1) que, le long d'une fibre, l'orientation optique

(1) *Bull. soc. minér.*, XV, p. 164.

variait d'une manière continue. L'axe de la fibre étant parallèle à la direction n_p du plus petit indice, les deux autres, n_g et n_m, tournent autour de n_p, à mesure qu'on va du centre à la périphérie, de manière à décrire une surface hélicoïdale, où le pas de l'hélice suit la même loi dans toutes les fibres.

M. Wallerant, ayant observé des enroulements semblables dans les mélanges isomorphes de bromate et d'azotate de sodium, a cherché à préciser les conditions de leur production (1) :

Quand deux substances sont isodimorphes, et qu'on les fait fondre en proportions variables, il y a d'ordinaire un intervalle pour lequel la cristallisation ne donne pas de produit isomorphe, mais seulement un conglomérat de cristaux des deux espèces. Dans ce cas, si l'on peut produire une surfusion, comme il arrive pour le bromate et l'azotate de soude, on obtient des sphérolithes où les fibres offrent le phénomène d'enroulement hélicoïdal.



Fig. 369.

Mais on réussit mieux encore si, à une substance dimorphe, on ajoute une autre substance qui cristallise difficilement par surfusion, par exemple, en ajoutant de l'acide santonique à de la malonamide. De même si, à de l'hydroquinone, on mêle une quantité suffisante d'acide tartrique, on voit la modification stable de l'hydroquinone former des sphérolithes en fibres allongées suivant la bissectrice obtuse de l'angle des axes optiques, autour de laquelle se produit l'enroulement. Alors, en lumière parallèle, le sphérolithe présente des zones colorées qui diffèrent par la teinte de polarisation, la biréfringence variant, d'une façon continue, depuis celle d'une section perpendiculaire à la bissectrice aiguë jusqu'à celle d'une section perpendiculaire à l'axe moyen (fig. 369).

Le sens de l'enroulement, dextrogyre dans la modification stable avec l'acide tartrique droit, est lévogyre avec l'acide tartrique gauche ; mais l'inverse a lieu pour la modification instable.

Tous les sphérolithes ainsi obtenus sont instables ; quand on les chauffe légèrement, ils se troublent par suite de l'exsudation d'une partie du corps dissous. Il s'agit là de véritables *solutions solides*, lesquelles se montrent susceptibles de sursaturation. D'autre part, c'est une coïncidence remarquable de voir que les corps *actifs*, qui par leur dissolution dans les autres peuvent y

(1) Comptes-rendus, CXLIII, pp. 555, 605, 694, 1169 ; *Bull. soc. minér.*, 1907.

déterminer des enroulements hélicoïdaux, sont précisément des corps doués du pouvoir rotatoire, tels que les acides tartrique et santonique.

Enfin l'extrême petitesse qu'on est obligé d'attribuer aux cristaux constituant la fibre conduit à considérer celle-ci comme homogène au même titre que les cristaux ordinaires. Dans ce cas, selon la remarque de M. Wallerant, il y aurait lieu d'admettre, à côté des corps cristallisés réticulaires, une nouvelle catégorie, celle des édifices hélicoïdaux, prenant naissance dans le milieu dyssymétrique constitué par le corps actif.

§ 3

CORROSION DES CRISTAUX. PSEUDOMORPHOSES

Figures de corrosion. — La symétrie intérieure de cristaux, dont les faces ne sont pas suffisamment développées, peut très heureusement être mise en évidence par les phénomènes de corrosion. Quand une face cristalline est exposée à l'action de vapeurs ou de liquides, capables de détruire ou de dissoudre la substance cristallisée, cette face commence par se couvrir de cavités qui dessinent sur son plan des *figures de corrosion* (*Aetzfiguren*). L'étude de ces figures, commencée par Widmanstätten et continuée par MM. Leydolt, Hirschwald, Exner, Baumhauer, etc., peut donner de précieuses indications sur la structure intime des cristaux, si l'on admet, ce qui semble indéniable, que les parois des cavités représentent des surfaces d'égale résistance vis-à-vis des réactifs employés et, par conséquent, appartiennent à des plans réticulaires de l'espèce.

Lorsque la corrosion se fait trop rapidement, les figures affectent en général des contours curvilignes; mais en conduisant l'expérience avec les précautions voulues, on voit les contours devenir très nets et les cavités sont limitées par des facettes planes. Si, tenant la face cristalline horizontale, on projette verticalement, de bas en haut, l'agent de corrosion sur un point déterminé, on obtient une incision unique et d'assez grande dimension. Au contraire, en étendant le liquide ou la vapeur sur toute la surface, on fait naître un nombre plus ou moins grand de cavités, qui donnent à l'ensemble un aspect damassé et dont l'étude doit se faire au microscope.

Comme résultat général, on peut dire que les figures de corrosion sont de véritables cristaux *négatifs* ou en creux, qui changent avec la nature de l'agent et avec l'orientation de la face cristalline, mais qui demeurent les mêmes pour tous les points d'une même face ainsi que pour toutes les faces d'une même forme simple. Dans tous les cas, leur symétrie exprime absolument celle du cristal.

Si la face attaquée est perpendiculaire à un plan de symétrie, le polygone de corrosion est symétrique relativement à une ligne parallèle à la trace de ce

plan. Si la face est normale à un axe de symétrie d'ordre n, le polygone possède une symétrie du même ordre relativement à un point du plan (1).

Dans toute l'étendue d'une même face, les figures sont semblables et ont la même orientation, à moins qu'il n'y ait une macle, auquel cas le changement de direction des figures la fait immédiatement reconnaître.

La forme absolue des figures varie avec la nature de l'agent de corrosion; mais leur symétrie n'en demeure pas moins conforme à celle du cristal.

Exemples de corrosion. — Des cubes de sel gemme, simplement exposés à l'air humide, laissent souvent apercevoir des cavités quadrangulaires, dont les contours sont parallèles aux arêtes cubiques, tandis que les facettes limites sont celles d'un tétrahexaèdre. Il en est de même du fer natif cubique, traité par les acides.

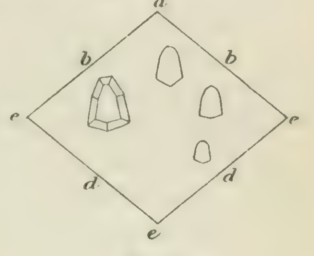
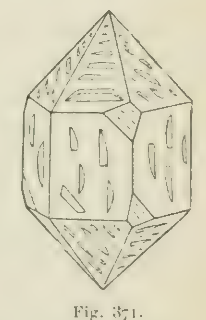


Fig. 370.

Sur une face p d'un rhomboèdre de clivage de calcite, l'acide chlorhydrique fait naître des figures d'apparence générale triangulaire (fig. 370) où l'on peut reconnaître la combinaison du rhomboèdre p avec un autre rhomboèdre et avec trois scalénoèdres. Avec l'acide sulfurique, on obtient des losanges ayant leurs diagonales parallèles à celles du rhombe p. Sur les cristaux hémimorphes de calamine, les figures ne sont pas terminées de la même manière aux deux extrémités d'une parallèle à l'axe d'hémimorphisme.


Fig. 371.

La figure 371, reproduite d'après M. Tschermak, fait connaître le mode de corrosion d'un cristal de Quartz dextrogyre, sous l'influence de l'acide fluorhydrique. On voit du premier coup d'œil la différence intrinsèque des faces p et $e^{\frac{1}{2}}$, malgré leur égal développement. Aucune des figures n'a d'axe de symétrie, ce qui prouve l'absence de plans de symétrie dans le polyèdre particulaire. De plus, tandis que les cavités des faces p sont allongées horizontalement, celles des faces $e^{\frac{1}{2}}$ descendent de gauche à droite sur les cristaux dextrogyres et de droite à gauche sur les cristaux lévogyres. De cette manière, le seul examen des figures de corrosion, même en l'absence de toute face rhombe ou plagièdre, permet de se prononcer sur la symétrie du quartz et sur le sens de son pouvoir rotatoire.

De même, M. Baumhauer a montré, par la corrosion des cristaux de sulfate de strychnine, que, malgré leur forme quadratique holoédrique, ces cristaux étaient en réalité hémiédriques, avec un polyèdre holoaxe hémisymétrique, ce que pouvait faire prévoir la faculté qu'ils ont de dévier le plan de polarisation de la lumière.

(1) Mallard, article CRISTALLOGRAPHIE, p. 720.

Le Mica Muscovite a été considéré d'abord comme hexagonal, puis comme rhombique. Or cette espèce présente, après attaque des faces de clivage par l'acide fluorhydrique, des figures dont la symétrie est seulement monoclinique, ce qui s'accorde avec les autres raisons qu'on a aujourd'hui de ranger le Mica dans le système binaire.

La corrosion ne s'attaque pas seulement aux faces des cristaux; elle peut émousser les arêtes en les remplaçant par de nouvelles facettes, toujours conformes à la symétrie du cristal et soumises à la loi des indices rationnels. M. Lavizzari, après avoir taillé de la calcite en forme de sphère, a pu lui donner, par corrosion, la figure d'un prisme hexagonal basé.

On comprend sans peine tout le parti que l'on peut tirer des figures de corrosion pour l'étude des cristaux complexes; car si un cristal d'apparence cubique est formé par le groupement d'éléments rhombiques, par exemple, les figures n'auront, sur chacune des plages élémentaires, que la symétrie rhombique. Ce procédé vient donc puissamment en aide à l'examen optique, pour dévoiler les défauts de symétrie que la disposition des groupements avait fait disparaître. M. Baumhauer s'en est servi avec grand succès pour mettre en évidence la structure compliquée des cristaux de Boracite et de Perowskite.

Corrosions naturelles. — Les cristaux naturels ont été souvent exposés à des actions corrosives; de là, sur quelques-unes de leurs faces, des signes dont l'importance n'a pas échappé aux observateurs; car on a depuis longtemps signalé, sur les faces *p* des birhomboèdres de quartz, de petites cavités triangulaires qui manquent aux faces $e^{\frac{1}{2}}$. Ce phénomène est assez fréquent sur les cristaux de Calcite, d'Orthose et de Topaze. Toutefois il ne faut pas le confondre avec les vides laissés par la cristallisation originelle ou avec les inégalités que produit le groupement plus ou moins régulier d'individus secondaires sur la surface d'un plus gros cristal.

M. vom Rath a décrit des cristaux de Quartz de Palombaja (île d'Elbe), où un commencement de corrosion a fait naître des facettes sur les arêtes et, d'après M. Groth, ce phénomène se produit d'une façon remarquable sur les Améthystes du Brésil (1).

Pseudomorphoses. — On donne le nom de *pseudomorphoses* aux phénomènes par suite desquels la forme cristalline d'un corps persiste, après que sa substance a été partiellement ou complètement remplacée par une autre.

Les pseudomorphoses sont de deux sortes : il y a d'abord les pseudomorphoses de *moulage*, qui se produisent quand une substance vient à cristalliser par-dessus des cristaux déjà formés, ou dans le vide laissé par leur disparition. Il est arrivé plus d'une fois qu'une *druse*, c'est-à-dire une cavité tapissée de cristaux cubiques de Fluorine, ait été remplie par du Quartz. Ce dernier a pris en creux l'empreinte des cubes et, après séparation mécanique ou chimique

(1) Tschermak, *Lehrbuch*, p. 140.

des deux sortes d'éléments, il est resté une masse quartzeuse, offrant *négativement* les formes de la Fluorine. Pareille chose s'est passée entre le Quartz et la Barytine.

Kenngott a proposé, pour ces moulages avec disparition de l'élément qui avait produit la forme cristalline, le nom de *pléromorphoses*.

Les véritables pseudomorphoses résultent d'une décomposition chimique, qui a entraîné un échange d'éléments, presque toujours par voie humide.

Les cristaux de carbonate de fer ou Sidérose se recouvrent à l'air d'une écorce d'oxyde hydraté, et parfois la transformation en Limonite est complète, sans que les rhomboèdres aient été altérés dans leur forme. De même, des cristaux de feldspath se montrent entièrement remplacés par du mica confusément cristallin. Le Gypse est fréquemment remplacé par du Quartz, et l'on voit ainsi, soit des cristaux lenticulaires de la forme du gypse, devenus assez durs pour rayer le verre, soit des couches de gypse fibreux, auxquelles la transformation en quartz n'a fait perdre ni leur couleur ni leur éclat. La Serpentine, lorsqu'elle offre des formes cristallines, laisse toujours reconnaître les faces caractéristiques du Péridot-Olivine, dont la transformation en silicate hydraté de magnésie est un fait très général.

Tantôt la transformation marche régulièrement de la périphérie au centre, où l'on peut retrouver un noyau intact; tantôt elle se propage de l'extérieur à la faveur de fissures, qui accidentent l'individu cristallin et facilitent la pseudomorphose.

§ 4

CRISTAUX LIQUIDES

Liquides biréfringents. — Une des plus intéressantes, parmi les dernières conquêtes de la Cristallographie expérimentale, est la découverte, principalement due à M. O. Lehmann (1), des *cristaux liquides*.

Dès 1888, M. Reinitzer avait remarqué que le benzoate de cholestéryle possédait pour ainsi dire deux points de fusion ; à 145°5, on obtenait un liquide trouble, qui restait tel jusqu'à 178°5, température à laquelle il devenait clair. En étudiant le liquide trouble, M. Lehmann constata qu'il était biréfringent, et que cette propriété disparaissait au moment où la clarification avait lieu. Bientôt on découvrait des liquides possédant à un degré beaucoup plus élevé la même particularité, au point que leur biréfringence serait égale à 40 fois celle du gypse : par exemple, le p- azoxyanisol, où les points de fusion sont

(1) Voir O. Lehmann, *Flüssige Kristalle*, Leipzig, 1904. — Schenk, *Kristallinische Flüssigkeiten und flüssige Kristalle*, Leipzig, 1905; voir aussi Gaubert, *Revue générale des sciences*, 1905, p. 983.

respectivement 116° et 134°, le p- azoxyphénétol (137°,5 et 168°); le p- azoxyamisolphénétol (93°,5 et 149°,6), puis l'anisaldazine, les propionate, acétate, oléate de cholestéryle, etc. A cette liste, M. Lehmann ajoute les oléates de potasse, de soude, d'ammoniaque, même l'iodure d'argent.

La viscosité de ces différents corps varie, depuis la fluidité de l'eau jusqu'à la consistance de la vaseline (oléate d'ammoniaque).

En général, le passage du liquide trouble au liquide clair est marqué par une brusque diminution de la densité. En outre, cette transformation est accompagnée par une absorption de chaleur, de sorte qu'il y a une analogie complète entre les points de fusion et les points de clarification. Tous deux d'ailleurs sont influencés par la pression, qui les élève quand elle augmente. Enfin le point de clarification paraît être abaissé par la présence d'une substance étrangère en dissolution, comme on sait qu'il arrive pour le point de fusion.

Cristaux mous, cristaux liquides. — L'étude optique, avec des grossissements de 40 diamètres en moyenne (mais qu'il faut parfois pousser entre 300 et 700 diamètres), fait reconnaître, avec les liquides les moins visqueux, des gouttelettes biréfringentes à contour rigoureusement sphérique et, avec ceux qui sont un peu visqueux, des cristaux allongés, aux extrémités arrondies, qui se déforment sous la moindre action. Ce sont des *cristaux mous*, offrant toutes les transitions possibles aux cristaux proprement dits.

Les gouttes ou cristaux liquides sont polychroïques et, de plus, jouissent de la polarisation rotatoire. Entre les nicols croisés, les gouttes, placées dans une certaine position dite principale, laissent voir une croix, noire dans les préparations minces, colorée en rouge ou en vert avec les gouttes épaisses. Les cristaux liquides ne sont donc pas assimilables à un cristal réticulaire, mais doivent être constitués à la façon des sphérolithes, où les particules seraient superposées un peu comme les lames de mica biaxe de l'expérience de Reusch.

La biréfringence des cristaux liquides de p- azoxyphénétol est égale à au moins trente fois celle du quartz. A l'état solide, le même corps a une biréfringence de 0,4, très supérieure à celle de la calcite et même du soufre.

Un champ magnétique agit sur l'orientation des cristaux liquides, où les particules s'orientent parallèlement aux lignes de force. Ceux de ces cristaux qui peuvent absorber des matières colorantes deviennent polychroïques. En passant à l'état solide, ils conservent le même polychroïsme et les mêmes directions d'extinction.

M. Lehmann a montré que la masse pâteuse, obtenue en fondant à 146° l'iodure d'argent hexagonal, était composée d'un agrégat de cristaux octaédriques entrant en vraie fusion à 450°. L'oléate d'ammoniaque, visqueux comme la vaseline, est constitué par une association de cristaux que la plus faible pression déforme. Produits dans l'alcool, deux de ces cristaux, amenés au contact, fusionnent en un seul ou engendrent une vraie macle.

Diverses expériences concluantes permettent de dire que les liquides biré-

fringents sont purs, et ne sauraient être assimilés à des émulsions. Enfin il n'y a pas de distinction fondamentale entre les cristaux mous et les gouttes liquides biréfringentes. Les uns et les autres peuvent se mélanger.

En somme, l'ensemble des propriétés des liquides cristallins paraît indiquer que leur biréfringence est réellement due à la structure de leurs particules.

Orientation des cristaux liquides. — La conclusion qui vient d'être indiquée semble résulter encore plus clairement des expériences faites sur le propionate de cholestéryle. La modification biréfringente de ce corps cristallise fréquemment en sphérolithes à enroulement hélicoïdal (ce qui, par parenthèse, constitue une nouvelle ressemblance entre les cristaux liquides et les cristaux solides). Reinitzer avait reconnu que les cristaux liquides de cette substance diffusaient une lumière colorée, dont la longueur d'onde augmentait à mesure que la température baissait.

M. Wallerant a constaté (1) que les sections perpendiculaires à l'axe jouissaient seules de cette propriété (qui par suite fournit le moyen de reconnaître l'orientation des cristaux). Or, si l'on fond le corps et qu'on le laisse refroidir lentement, il se prend d'abord en cristaux liquides, sous forme d'étoiles radiées à croix noire, et ne diffuse aucune lumière, les fibres étant parallèles à l'axe optique. Mais si on remue la lamelle couvre-objet, on détruit les étoiles et le liquide reprend la propriété de diffuser la lumière par toute sa surface. En effet, la plupart des corps de la chimie organique, étudiés sur lames de verre, cristallisent par fusion avec un de leurs axes d'élasticité optique disposé normalement au couvre-objet. Si l'on vient à agiter le liquide, on détruit les étoiles, c'est-à-dire l'édifice cristallin; mais on ne détruit pas les éléments et alors ceux-ci, sous l'influence du verre couvre-objet, s'orientent de telle sorte que leur axe optique soit perpendiculaire à la surface de la lame de verre (2).

Cette homogénéité d'orientation est particulièrement nette avec un certain éther de la série para-azoxyzime. Lorsqu'on chauffe une aiguille solide de cet éther, on la voit se transformer à 140° en un cristal mou quadratique, dont les faces sont assez courbes pour donner au cristal l'aspect général d'une goutte liquide. Or si l'on comprime le cristal entre des lamelles de verre, on constate que la lame à faces parallèles ainsi obtenue reste constamment éteinte entre nicols croisés.

Il ne saurait être ici question de disposition réticulaire. Dès lors tout porte à croire que l'élément mobile consiste en un groupement de molécules relativement stable. Aussi croyons-nous, avec M. Wallerant, que cette expérience ajoute un nouveau poids à la notion de *particule complexe*, élément initial de la cristallisation, qui se formerait préalablement à l'édification d'un vrai cristal. Ce dernier différerait du liquide biréfringent en ce que les particules déjà formées se disposeraient en réseau.

(1) *Comptes rendus*, CXLIII, p. 605.

(2) Le fait est à rapprocher de l'orientation de la glace des lacs, où l'axe optique est perpendiculaire à la surface de congélation.

LIVRE TROISIÈME

DESCRIPTION DES ESPÈCES MINÉRALES

PREMIÈRE SECTION

GÉNÉRALITÉS SUR LES ESPÈCES MINÉRALES

CHAPITRE I

COMPOSITION CHIMIQUE DES ESPÈCES

§ 1

ÉLÉMENTS CHIMIQUES DES MINÉRAUX

Corps simples. Leur définition. — Les espèces minérales sont formées par l'association, en proportions définies, de *corps simples*, c'est-à-dire d'éléments qui ont résisté jusqu'ici à toute tentative faite pour les décomposer. Dans l'état actuel de la science, le nombre de ces éléments paraît être d'environ 80. Mais beaucoup d'entre eux sont spéciaux à une catégorie très restreinte de minéraux, de telle sorte qu'un petit nombre d'éléments suffit à produire la grande diversité des espèces naturelles.

Chaque élément se caractérise par ses propriétés physiques à l'état isolé, par ses affinités chimiques, mais surtout par le poids de ce corps qui intervient dans les combinaisons de même ordre avec les autres éléments, suivant les lois dites des *proportions définies* et des *proportions multiples*. Ce poids est évalué par comparaison avec celui d'un certain corps simple pris pour unité et prend le nom d'*équivalent chimique* de l'élément. Il est représenté dans les formules par un symbole. Ainsi H est le symbole de l'hydrogène, Cl celui du chlore, et le symbole HCl représente un composé dans lequel, l'hydrogène entrant pour 1, le chlore entre précisément pour le nombre que les chimistes ont admis comme son équivalent relativement à l'hydrogène.

Poids atomiques. — Les combinaisons chimiques ne paraissent pas pouvoir s'opérer autrement que par l'union des atomes. Si donc on a des raisons de croire qu'une combinaison donnée soit la plus simple qui puisse exister entre deux corps, il semble naturel d'admettre qu'elle a eu lieu entre deux atomes et, par suite, que les équivalents représentent les *poids respectifs des atomes*, c'est-à-dire les *poids atomiques*. Cependant cette interprétation laisse subsister quelque arbitraire. Ainsi la formule de l'eau peut s'écrire HO, auquel cas l'équivalent de l'oxygène, relativement à l'hydrogène, est 8, puisqu'il faut, en poids, 8 parties d'oxygène contre une d'hydrogène pour faire de l'eau. Dans ce cas, l'atome d'hydrogène pesant 1, celui d'oxygène pèserait 8. Mais si la formule de l'eau devait s'écrire H^2O, le poids de l'hydrogène s'appliquerait alors à deux atomes et, dans ce cas, le poids atomique de l'oxygène deviendrait égal à 16.

Loi des volumes. — Pour lever cette incertitude, on a recours, toutes les fois que cela est possible, à la considération du volume occupé par les corps gazeux. En effet, d'après la loi découverte par Gay-Lussac (1), il y a toujours un rapport simple entre les volumes (mesurés à la même pression) de deux gaz qui se combinent et, de plus, le volume du composé gazeux est aussi dans un rapport simple avec les volumes des gaz composants. En général, on constate qu'il y a union de 1 volume d'un gaz avec 1 ou 2 volumes d'un autre et que le **composé résultant forme deux volumes.**

Les rapports volumétriques des gaz qui se combinent offrent donc les mêmes relations de fixité que les *poids respectifs*, c'est-à-dire les *équivalents*, de ces éléments, d'où il résulte qu'il doit y avoir un rapport déterminé entre les *poids spécifiques* (ou poids sous l'unité de volume) des gaz et leurs *poids atomiques*.

Pour découvrir la loi de ce rapport, considérons l'acide chlorhydrique, qui appartient au type de combinaison le plus simple et dans lequel il entre un équivalent d'hydrogène, pesant 1, pour un équivalent de chlore, pesant 35,5. Ces deux quantités occupent, à l'état gazeux, le même volume. Mais, en outre, puisqu'elles sont proportionnelles aux équivalents chimiques, chacune d'elles peut être considérée comme représentant l'*unité de matière* du gaz correspondant; car cette unité a précisément l'équivalent pour mesure. Donc l'unité de matière d'hydrogène occupe le même volume que l'unité de matière de chlore; ce qu'on peut exprimer encore en disant que, à l'état gazeux, des volumes égaux de ces deux éléments *renferment le même nombre de particules intégrantes ou molécules*.

Ce résultat peut être généralisé et appliqué à tous les gaz. En effet, l'expérience indique que les combinaisons gazeuses se faisant par l'union de 1 volume avec 1, avec 2 ou avec 3 volumes, les composés résultants occupent toujours soit 1, soit 2 volumes. Or, dans le premier cas, on peut s'assurer par l'obser-

(1) Consulter, pour les développements relatifs au sujet que nous nous contentons ici d'effleurer, Wurtz, *la Théorie atomique*, Paris, 1879. — Naquet et Hanriot, *Principes de chimie fondée sur les théories modernes*, 2 vol. in-18.

vation que le chiffre 1 est théorique, car la plus petite quantité du gaz qui *puisse* se former à l'état libre occupe en réalité deux volumes. Nous sommes donc ainsi conduits à l'hypothèse depuis longtemps formulée par Avogadro et Ampère, d'après laquelle *tous les gaz composés, pris dans les mêmes circonstances de température et de pression, occupent le même volume par unité de matière*, ce qui revient à dire que *des volumes égaux de gaz renferment le même nombre de molécules.*

On voit de suite que la même loi est applicable aux gaz simples, si l'on admet que, pour chacun d'eux, l'atome ne constitue pas nécessairement le dernier élément matériel; de sorte qu'il y a des gaz simples dont la *molécule* peut être formée de deux ou plusieurs atomes semblables.

Cette identité de tous les gaz, au point de vue du nombre de molécules par unité de volume, n'est pas une hypothèse uniquement fondée sur la chimie. Elle s'impose avec non moins de force, si l'on fait intervenir la loi de Mariotte et la considération de l'égale dilatabilité des gaz. En effet, dans un corps élastique, la compression ou la dilatation doit être proportionnelle à la distance des parties compressibles, c'est-à-dire à la valeur des intervalles intermoléculaires. Cela posé, dire que tous les gaz parfaits sont également dilatables ou compressibles, c'est dire que tous ont la même valeur moyenne pour la distance des molécules ou, en d'autres termes, qu'un volume donné de gaz, à une certaine pression, contient toujours le même nombre de molécules, quelle que soit sa nature.

Il convient toutefois d'introduire cette restriction, que la règle d'Avogadro et d'Ampère est une règle-limite, qui n'est rigoureusement exacte que dans le cas d'une pression nulle. A la température de zéro et sous une pression d'une atmosphère normale, les volumes de divers gaz qui contiendraient exactement le même nombre de molécules seraient entre eux comme

$$\frac{1}{(1+a)(1-b)}, \quad \frac{1}{(1+a')(1-b')}, \quad \frac{1}{(1+a'')(1-b'')}$$

les nombres a, b, a', b', a'', b'', étant des constantes propres à chaque gaz et dont la valeur est toujours inférieure à 0,01 (1).

En revanche, si l'on prend les densités de différents gaz sous des *états correspondants,* tels qu'ils ont été définis par Van der Waals, et qu'on les ramène à zéro ainsi qu'à une atmosphère normale par les formules des gaz parfaits, on peut dire que ces densités deviennent rigoureusement proportionnelles aux poids moléculaires des gaz considérés (2).

Poids moléculaires. — De cette manière, pour connaître exactement les poids des molécules, il suffit de pouvoir déterminer, sous la réserve qui vient d'être indiquée, la densité des corps à l'état gazeux (3) et, en prenant pour

(1) Guye, *Bull. soc. chimique de Paris,* 8[e] série, t. 33 (1905), p. x.

(2) Guye, *loc. cit.*

(3) En réalité le poids moléculaire d'un gaz est proportionnel, non pas à sa densité réelle, mais au produit de cette densité par son volume moléculaire.

unité le poids de l'hydrogène, qui est le moins pesant de tous sous l'unité de volume, on aura la série des *poids moléculaires*, rapportés à l'hydrogène.

Ces poids moléculaires seront-ils, pour les corps simples, l'exacte représentation des *poids atomiques*? c'est-à-dire pourra-t-on considérer chacun d'eux comme égal au poids d'un atome simple du corps correspondant? Pour le savoir, examinons ce qui se passe dans les combinaisons hydrogénées.

La densité d'un gaz, celle de l'hydrogène étant prise pour unité, représente le rapport du poids de 1 volume du gaz considéré au poids de 1 volume d'hydrogène. Mais quand 1 volume d'hydrogène, contenant 1 atome de ce gaz, dont le poids est 1, s'unit à 1 volume de chlore, pesant 35,5 (1), il en résulte *deux volumes* d'acide chlorhydrique, dont la densité est 18,25. La *molécule* d'acide chlorhydrique, pour renfermer au moins un atome indivisible d'hydrogène, doit donc représenter *le poids de deux volumes*, c'est-à-dire, dans l'espèce, 36,5 et, en vertu du principe posé plus haut, il en doit être de même de tous les gaz. En un mot, les *poids moléculaires* sont les poids de deux volumes, l'unité de volume étant définie par le volume qu'occupe un seul *atome* d'hydrogène. Par suite, le *poids atomique* de ce gaz étant 1, son poids moléculaire est 2; de même, la vapeur d'eau étant 9 fois plus dense que l'hydrogène, cela signifie que la molécule d'eau pèse 18 fois plus que l'*atome* d'hydrogène, c'est-à-dire que le *poids moléculaire* de l'eau est égal à 18, le poids atomique de l'hydrogène étant égal à 1.

On en déduit la règle suivante (2) : Pour avoir le poids moléculaire d'un corps, chercher combien de fois sa densité, à l'état gazeux, surpasse celle de l'hydrogène et multiplier le nombre obtenu par 2. Ainsi, la densité de l'oxygène étant 16 fois plus grande que celle de l'hydrogène, le poids moléculaire de l'oxygène est 32 et correspond à deux atomes, c'est-à-dire à 2O. L'ammoniaque gazeuse, 8 fois et demie plus dense que l'hydrogène, a son poids moléculaire égal à 17. L'analyse partage ce poids en 3 d'hydrogène et 14 d'azote, ce qui donne, pour la molécule, la formule AzH^3.

Le poids moléculaire d'un corps étant le double du rapport de la densité de ce corps (supposé gazeux) à celle de l'hydrogène et la densité de l'hydrogène étant à celle de l'air dans le rapport de 1 à 14,44, on peut dire que *le poids moléculaire est le produit de la densité du corps à l'état gazeux par* $2 \times 14,44$ *ou* 28,88.

Corps non gazeux. Considération de la chaleur spécifique et de l'isomorphisme. — La règle indiquée permet de déterminer les poids moléculaires de tous les corps gazeux ou susceptibles d'être réduits en vapeur. Pour les autres, on est obligé de recourir à l'interprétation de leurs propriétés physiques ou chimiques, telles que la chaleur spécifique.

(1) On semble préférer aujourd'hui la valeur 35,45.

(2) Voir plus loin la modification apportée à cette manière de faire depuis la constitution de la commission internationale des poids atomiques.

En effet, Dulong et Petit ont établi par l'expérience cette loi fondamentale, que la *chaleur spécifique* des corps simples solides, c'est-à-dire la chaleur qu'il faut communiquer à *l'unité de poids* de ces corps, pour élever leur température d'un degré, est en *raison inverse du poids atomique*, de telle sorte que le produit de la chaleur spécifique par le poids atomique, produit qu'on nomme la *chaleur atomique*, est un nombre constant.

Il résulte de là que les atomes simples, quelle que soit leur nature, ont exactement *la même capacité pour la chaleur*, propriété bien remarquable et du même ordre que celle qui assigne aux molécules gazeuses un volume indépendant de leur espèce.

Le produit moyen des chaleurs spécifiques par les poids atomiques rigoureusement déterminés étant égal à 6,4, ce nombre, appelé *chaleur atomique*, peut servir à calculer le poids atomique des corps dont la densité de vapeur est inconnue, mais dont on a pu mesurer la chaleur spécifique (dans les limites de température où cette chaleur se maintient constante).

D'autre part, Raoult a démontré que, dans les dissolutions moyennement concentrées des composés salins par une quantité constante d'un même dissolvant susceptible d'être solidifié, l'abaissement du point de congélation de ce dernier est proportionnel au poids moléculaire des corps dissous.

Enfin une autre ressource consiste à faire intervenir la considération de l'isomorphisme, les corps isomorphes ayant en général le même volume moléculaire.

Tableau des poids atomiques. — Le tableau de la page 404 fait connaître la série des symboles et des poids atomiques des corps simples connus. Dans les éditions précédentes, et conformément à la tradition jusqu'alors suivie par tous les chimistes, les poids atomiques se trouvaient évalués en fonction de celui de l'hydrogène, pris pour unité. Depuis quelques années, il a été constitué, en vue de cette détermination, une commission internationale, qui a dû tout d'abord prendre acte de ce fait, que le rapport du poids atomique de l'oxygène à celui de l'hydrogène, longtemps admis comme rigoureusement égal à 16, était en réalité légèrement plus faible.

Fallait-il alors, gardant le poids de l'hydrogène pour unité, modifier en conséquence tous les chiffres jusqu'alors acceptés ? Il a paru préférable de s'en tenir à 16 pour le poids atomique de l'oxygène, d'abord dans l'espérance de conserver une plus grande quantité de nombres simples, ensuite parce que le passage du poids atomique de l'oxygène à celui des autres corps est beaucoup plus direct et comporte moins de causes d'erreur que quand on part de l'hydrogène. Dans ce cas, le poids atomique de l'hydrogène serait de 1,008 au lieu de 1. Quant à 16, poids atomique de l'oxygène, il avait été calculé en prenant la moitié du poids moléculaire 32, dans l'hypothèse où l'unité des poids moléculaires eût été le poids de 2 grammes d'hydrogène, lesquels, à zéro et sous la pression normale, correspondaient à 22 litres et 24 centièmes. 16 repré-

Tableau des poids atomiques des corps simples.

Aluminium	Al	27 1	Molybdène	Mo	96
Antimoine	Sb	120,2	Néodyme	Nd	143,6
Argent	Ag	107,89	Néon	Ne	20
Argon	Ar	39,9	Nickel	Ni	58,7
Arsenic	As	75	Niobium ou Columbium	Nb, Cb	94
Azote ou Nitrogène	Az, N	14,01	Or	Au	197,2
Baryum	Ba	137,4	Osmium	Os	191
Bismuth	Bi	208	Oxygène	O	16
Bore	B	11	Palladium	Pd	106,5
Brôme	Br	79 96	Phosphore	P	31
Cadmium	Cd	112 4	Platine	Pt	194,8
Cæsium	Cs	132 9	Plomb	Pb	206,9
Calcium	Ca	40,1	Potassium	K	39.15
Carbone	C	12	Praséodyme	Pr	140.54
Cerium	Ce	140,25	Radium	Ra	226,20
Chlore	Cl	35.45	Rhodium	Rh	103
Chrome	Cr	52,1	Rubidium	Rb	85,5
Cobalt	Co	59	Ruthénium	Ru	101,7
Cuivre	Cu	63.53	Samarium	Sa	150,48
Dysprosium	Dy	162,45	Scandium	Sc	44.1
Étain	Sn	119	Sélénium	Se	79 2
Europium	Eu	151 93	Silicium	Si	28,4
Fer	Fe	55,9	Sodium	Na	23,05
Fluor	F, Fl	19	Soufre	S	32,06
Gadolinium	Gd	157,24	Strontium	Sr	87,6
Gallium	Ga	70	Tantale	Ta	181
Germanium	Ge	72,5	Tellure	Te	127,6
Glucinium ou Beryllium	Gl, Be	9,1	Terbium	Tb	159.34
Helium	He	4	Thallium	Tl	204.1
Hydrogène	H	1,008	Thorium	Th	232,5
Indium	In	115	Titane	Ti	48,1
Iode	I	126,89	Tungstène	W	184
Iridium	Ir	193	Uranium	U	238,5
Krypton	Kr	81,8	Vanadium	V	51,2
Lanthane	La	139	Ytterbium	Yb	173
Lithium	Li	7,03	Yttrium	Y	89
Magnésium	Mg	24 36	Zinc	Zn	65,4
Manganèse	Mn	55	Zirconium	Zr	90,6
Mercure	Hg	200			

sente donc le nombre de grammes que pèse, dans les conditions indiquées, un volume d'oxygène égal à 11 litres 12 dixièmes, constante expérimentale qui s'appliquerait à tous les corps gazeux.

Seulement, si la plupart des corps sont *diatomiques*, c'est-à-dire si leur molécule doit être divisée en deux atomes, il y en a, comme le mercure et le zinc, qui sont *monoatomiques*, tandis que le phosphore et l'arsenic sont *tétratomiques*, le soufre à 500 degrés étant *hexatomique*, etc.

Dans le tableau, on n'a pas fait figurer trois éléments des terres rares, dont l'individualité ne paraît pas douteuse, mais qui n'ont encore été qu'entrevus, à savoir l'*Holmium*, l'*Erbium* et le *Thulium*. De même, on a supprimé le *Decipium*, admis depuis quelques années sur la foi d'expériences inexactement interprétées (1).

Les chiffres du tableau sont en général conformes à la table des poids atomiques, publiée chaque année dans le *Bulletin de la société chimique*; mais quelques-uns d'entre eux ont été modifiés conformément à de récentes déterminations.

Classification des corps simples. — Les corps simples ont été répartis en deux grandes classes : 1° celle des *métaux*, jouissant de l'éclat dit métallique, bons conducteurs de l'électricité et du calorique, doués d'une forte densité, toujours électro-positifs dans leurs combinaisons avec les autres corps, enfin donnant, par leur union avec l'oxygène, des bases plutôt que des acides; 2° la classe des *métalloïdes*, doués de toutes les propriétés inverses.

Mais il s'en faut de beaucoup qu'on soit absolument d'accord sur les limites des deux classes. Ainsi, pour M. Tschermak, aux métalloïdes appartiennent seulement les corps suivants : Oxygène, Phosphore, Azote, Titane, Silicium, Carbone, Bore, Iode, Brome, Chlore, Fluor, Tellure, Sélénium, Soufre. Tous les autres sont des *métaux*, parmi lesquels il y a lieu de distinguer les métaux *cassants* (*Sprödmetalle*), Bismuth, Antimoine, Arsenic; les métaux *lourds*, Zinc, Cadmium, Plomb, Étain, Cuivre, Argent, Mercure, Or, Platine, Fer, Manganèse, Cobalt, Nickel, Chrome, Vanadium, Molybdène, Tungstène, Uranium; enfin les métaux *légers*, au-dessus desquels l'hydrogène occupe une place à part.

Au contraire, d'autres chimistes rangent le Zirconium, le Titane, l'Étain, le Thorium, l'Arsenic, l'Antimoine, le Bismuth, l'Uranium, le Tantale, le Niobium et le Vanadium parmi les métalloïdes.

Dans ces derniers temps, divers savants, et notamment M. Mendélejeff, ont cherché à montrer que les propriétés des corps, fusibilité, volatilité, ductilité, etc., pouvaient être regardées comme des *fonctions périodiques* de leurs poids atomiques. Partant de cette idée, on a essayé d'établir une classification naturelle des éléments en séries, d'après la double considération des poids

(1) Nous rappellerons que l'ancien Didyme (Di) a été divisé en deux éléments, le Néodyme et le Praséodyme.

atomiques et de ce que les chimistes ont appelé la *valence* des atomes, c'est-à-dire la faculté que possède chacun d'eux de s'unir à un nombre plus ou moins considérable d'atomes d'hydrogène.

Mais quelque intéressantes que soient ces tentatives, elles ont beaucoup perdu de leur valeur, depuis qu'on a introduit, dans la détermination des poids atomiques, une rigueur qui a fait ajouter presque partout des décimales à des nombres jusque-là réputés simples. D'ailleurs il semble impossible de faire rentrer dans une classification périodique les éléments, au nombre de quinze, qu'on rencontre dans le groupe des *terres rares*, c'est-à-dire celui du Cerium, du Lanthane, du Néodyme, etc.

État naturel des substances minérales. — Parmi les corps simples, il en est peu qui soient assez difficilement altérables pour se présenter à l'état natif. Si l'on excepte les corps gazeux, tels que l'oxygène, l'azote, etc., on n'en compte guère que onze qui soient dans ce cas; encore, pour la plupart d'entre eux, l'état natif n'est-il qu'une exception. Ce sont, en fait de métalloïdes, le soufre et le carbone; en fait de corps métalliques cassants, l'arsenic, l'antimoine, le bismuth; parmi les métaux lourds, l'or, l'argent, le mercure, le cuivre, le fer, le platine (auquel il convient encore d'ajouter l'iridium et le palladium).

La très grande majorité des espèces minérales résulte de l'union de deux ou plusieurs éléments simples. En général, les métaux légers figurent dans des combinaisons oxygénées, ou en compagnie des corps haloïdes, tandis que la plupart des métaux lourds se montrent combinés avec le soufre, le sélénium, le tellure, en même temps qu'avec l'arsenic et l'antimoine, qui, malgré leur aspect métallique, jouent plutôt en chimie le rôle de métalloïdes. Aussi ces corps ont-ils reçu le nom de *minéralisateurs*, parce qu'on peut admettre qu'ils ont, en quelque sorte, servi de véhicules aux matières métalliques lourdes, pour les amener de l'intérieur du globe jusqu'au voisinage de la surface.

Les minéraux de beaucoup les plus abondants de la croûte terrestre, là où cette dernière n'a pas subi de remaniements ultérieurs, sont des *silicates*. Ce sont eux qui constituent, presque seuls, toutes les roches qu'on peut appeler fondamendales. Ils sont essentiellement stables et généralement réfractaires. A l'extrême opposé de la série apparaissent les combustibles fossiles, pour la plupart d'origine organique et que leur enfouissement a seul préservés de la destruction qu'ils eussent encourue à l'air libre. Ils forment un véritable trait d'union entre le monde organique et le monde inorganique.

Importance relative des divers éléments. — On remarquera que le *silicium* qui, par son union avec l'oxygène, a été l'agent par excellence de la formation de la croûte terrestre, et le *carbone* qui, en se combinant avec l'hydrogène et l'oxygène, suffit presque à constituer tous les tissus organiques, appartiennent à la même famille chimique et se placent exactement l'un à côté de l'autre par leurs propriétés. Et pourtant, alors que la silice donne les com-

posés les plus stables qu'il soit possible d'imaginer, les combinaisons du carbone se distinguent, au contraire, par une instabilité qui répond bien à l'incessant besoin de transformation de la nature vivante. Rien n'est plus curieux que ce contraste entre ces deux pôles du monde minéral, le silicium et le carbone, si rapprochés l'un de l'autre à l'état libre, si profondément séparés aussitôt qu'ils entrent en combinaison.

L'analyse des minéraux répandus dans la croûte du globe montre que l'oxygène constitue, à lui seul, la moitié en poids de la partie de cette croûte accessible à nos investigations; après lui vient le silicium, qui forme 28 pour 100 de toutes les masses cristallines d'origine éruptive. Le groupe qui comprend l'oxygène, le silicium, l'aluminium, le magnésium, le calcium, le potassium, le sodium, le fer et le carbone, constitue les $\frac{977}{1000}$ de l'écorce. Dans ce qui reste, la prédominance appartient à l'ensemble du soufre, de l'hydrogène, du chlore et de l'azote (1).

§ 2

ANALYSE ET NOMENCLATURE DES ESPÈCES

Importance de l'analyse chimique. Analyse quantitative des silicates. — Deux espèces minérales sont distinctes lorsqu'elles n'ont pas la même composition chimique (en tenant compte, s'il y a lieu, des relations d'isomorphisme), ou lorsque, l'analyse ayant révélé les mêmes éléments, dans les mêmes proportions relatives, l'étude cristallographique amène à reconnaître une différence de forme dans les polyèdres particulaires. Il suit de là que l'analyse chimique, combinée avec l'examen cristallographique, est le fondement de la détermination des espèces.

Mais l'analyse quantitative est du ressort de la chimie et nous n'avons pas ici à nous en occuper (2). Seulement, en raison de l'importance exceptionnelle du groupe des silicates, nous indiquerons tout d'abord la méthode que Henri Sainte-Claire Deville a préconisée pour l'analyse des minéraux de ce groupe.

On opère sur une quantité de substance qui varie de 0gr,5 à 1 gramme. La matière est intimement mélangée, dans un creuset de platine, avec une égale quantité de carbonate de chaux bien pur. On chasse doucement l'acide carbonique par l'application de la chaleur d'un bec de Bunsen, après quoi la fusion du silicate est obtenue dans un four à air forcé.

La matière vitreuse qui en résulte ayant été concassée et pulvérisée dans un mortier d'agate, on pèse la poudre dans une capsule de platine, on l'humecte de

(1) Dana, *Manual of Geology*.

(2) Pour les détails de ce genre d'opérations, voir, entre autres ouvrages, *Precis d'analyse quantitative* de Classen, trad. par L. Gautier, Paris, 1888.

quelques gouttes d'eau et on ajoute 15 grammes d'acide nitrique concentré, mais non fumant. On évapore à sec le produit, d'abord gélatineux, de l'attaque, puis on calcine et on fait bouillir la matière avec une solution de nitrate d'ammoniaque. En décantant, on obtient sur le filtre un dépôt de silice, d'alumine, d'oxyde de fer et d'acide titanique, tandis que les nitrates alcalins et alcalino-terreux passent dans la liqueur.

En versant sur le filtre une vingtaine de grammes d'acide nitrique, on redissout le papier, le fer et l'alumine; la silice et l'acide titanique sont pesés ensemble, puis séparés par l'acide fluorhydrique chaud, qui ne dissout que la silice.

La solution de fer et d'alumine ayant été évaporée à sec, puis le résidu calciné et pesé, on soumet ce dernier, dans un tube de platine, à l'action de deux courants consécutifs, l'un d'hydrogène, l'autre d'acide chlorhydrique sec; le fer est entraîné à l'état de chlorure, qu'on peut analyser directement; l'alumine est isolée et pesée.

Quant à la liqueur qui renferme la chaux, la magnésie, la potasse et la soude, on la traite par l'oxalate d'ammoniaque, qui sépare la chaux. Le liquide ayant été évaporé, le résidu est calciné avec un excès d'acide oxalique, qui transforme les nitrates en carbonates. Celui de magnésie, insoluble à chaud, est séparé par filtration. La solution des carbonates alcalins, traitée par l'acide chlorhydrique, laisse les alcalis à l'état de chlorures, qu'on pèse après évaporation et qu'on sépare, soit à l'aide du chlorure de platine, soit en faisant intervenir les sels de bismuth.

Détermination des formules des minéraux. — Quand l'analyse chimique a fait connaître la nature et les proportions relatives des divers éléments d'une espèce, il est facile d'en déduire sa formule. En effet, soit une combinaison ternaire où les poids respectifs des trois éléments sont entre eux comme les nombres M, N, P.

Si A, B, C sont les poids atomiques respectifs des éléments, on aura

$$M = mA \qquad N = nB \qquad P = pC,$$

m, n et p étant des nombres entiers. On déterminera ces nombres par les relations

$$m = \frac{M}{A} \qquad n = \frac{N}{B} \qquad p = \frac{P}{C},$$

et la formule de l'espèce se composera des symboles des trois éléments, affectés d'exposants respectivement égaux à m, n et p.

Ainsi l'analyse d'une Chalcopyrite ayant donné 30,47 de fer, 34,40 de cuivre et 35,87 de soufre, les quotients de ces nombres par les poids atomiques seront

$$\frac{30,47}{56} = 0,544 \qquad \frac{34,40}{63,5} = 0,541 \qquad \frac{35,87}{32} = 1,120$$

Les trois quotients sont entre eux, à peu de chose près, comme les nombres 1 : 1 : 2,06, ou, en gros, 1 : 1 : 2. On admettra donc que la formule de la Chalcopyrite doit être écrite Fe Cu S^2.

Il resterait à contrôler cette formule, qui n'exprime que des rapports de poids. Ce serait chose facile, d'après ce que nous avons dit précédemment, si l'on pouvait déterminer la densité de vapeur de la Chalcopyrite. Mais la plupart des minéraux échappent à ce moyen de contrôle. Aussi leurs formules ne sont-elles que provisoires et les symboles qui y figurent peuvent toujours être multipliés par un même coefficient, si les analogies du minéral avec un autre, dont la densité de vapeur ait été déterminée, conduisent à le faire, ou si l'interprétation de certaines propriétés chimiques semble l'exiger. C'est ainsi que plusieurs minéralogistes préfèrent, pour la Chalcopyrite, la formule $Fe^2 Cu^2 S^4$, de même que, pour la Proustite, on admet parfois $Ag^8As^2S^6$ au lieu de Ag^4AsS^3, qui est cependant plus simple.

Très souvent, au lieu de formules atomiques, comme celles qui viennent d'être données, on en emploie d'autres, où les éléments sont déjà groupés en combinaisons définies. Ainsi l'analyse de l'Analcime de Fassa ayant fourni

Silice	55,22	:	60 = 0,9187
Alumine	22,99	:	103 = 0,2232
Soude	13,53	:	62 = 0,2182
Eau	8,27	:	18 = 0,4594

et les rapports des quatre quotients étant à peu près ceux des nombres 4 : 1 : 1 : 2, on écrit souvent la formule de l'Analcime :

$$4SiO^2.\ Al^2O^3.\ Na^2O.\ 2H^2O.$$

Mais, ainsi que nous avons eu l'occasion de le dire en partant de considérations cristallographiques, ce groupement des éléments constituants nous paraît tout à fait factice et nous préférons nous en tenir, sauf quelques cas spéciaux, à la méthode des atomistes, pour qui la formule de l'Analcime doit s'écrire :

$$Al^2Na^2H^4Si^4O^{13}.$$

Quand deux éléments peuvent se remplacer mutuellement par isomorphisme, on groupe leurs symboles dans des parenthèses, en les séparant les uns des autres par des virgules. Ainsi $(K, Na)^2$ indique que 2 atomes d'un radical alcalin peuvent être fournis indifféremment par le potassium ou par le sodium.

Dans un certain nombre d'ouvrages de minéralogie, l'oxygène s'indique par des points placés au-dessus du symbole O ; ainsi $\dddot{O}$ pour O^3. Le soufre aussi se représente par des traits verticaux. P|b étant l'équivalent de PbS. Enfin on emploie aussi des lettres barrées pour doubler les symboles, par exemple $\dddot{\overline{Al}}$ pour Al^2O^3.

Ajoutons que, dans les ouvrages allemands, les chiffres qui désignent le nombre des atomes sont placés en bas; ainsi Al_2O_3 au lieu de Al^2O^3.

Influence de la pureté des substances. — Il est rare que l'analyse d'un minéral, même cristallisé, réponde d'une façon rigoureusement exacte à la formule atomique admise. Non seulement il y a de fréquentes substitutions d'éléments isomorphes; mais l'analyse accuse aussi la présence de substances étrangères. Le microscope en donne la raison, lorsqu'il nous révèle, même au sein des minéraux qui paraissent le plus purs, l'existence d'*inclusions*, en nombre plus ou moins considérable. Lorsqu'on les a reconnues, on peut essayer de les séparer, en combinant l'emploi des liqueurs titrées de grande densité, telles que le tungstoborate de cadmium, l'iodure de méthylène, étendu de benzine ou de xylol, avec l'action graduée des acides chlorhydrique et fluorhydrique, enfin avec un triage à la main, opéré sous le microscope. On obtient de cette manière des résidus relativement très purs, dont l'analyse fournit, pour les rapports d'oxygène, des nombres extrêmement voisins de ceux qu'indique la théorie (1).

Nomenclature minéralogique. — Un bon nombre d'espèces minérales sont connues depuis une haute antiquité; à celles-là, l'usage a imposé des noms que la science a souvent acceptés. Pour les autres, les fondateurs de la minéralogie ont adopté, tantôt des dénominations dont l'étymologie grecque était empruntée à l'une des principales particularités de la substance (par exemple, l'*Axinite*, ainsi nommée par Haüy à cause de l'aspect coupant de ses cristaux, qui les fait ressembler au tranchant d'une hache), tantôt des noms rappelant la composition chimique (par exemple, *chaux fluatée* pour le fluorure de calcium, *magnésie boratée, zinc oxydé silicifère*, etc.).

Depuis longtemps l'usage a prévalu d'assigner à chaque espèce, et même à chaque variété, un nom univoque qui rappelle, soit une propriété de l'espèce, soit le nom du gisement, soit celui du savant qui a découvert le minéral, soit enfin celui d'une personne à qui on a cru convenable de le dédier. La plupart de ces noms, il est vrai, ont l'inconvénient de n'offrir à l'esprit rien qui puisse mettre sur la voie de la composition du minéral. Mais leur brièveté présente, dans la pratique, d'incontestables avantages et, de plus, ils sont entièrement indépendants des fluctuations de la nomenclature chimique. On peut même dire que les meilleurs sont ceux qui ont été formés avec des noms de personnes ou de pays; car souvent, après avoir cru bien faire en désignant une espèce par une particularité regardée comme caractéristique, on a retrouvé cette particularité mieux empreinte encore dans un minéral différent. Nous aurons d'ailleurs soin d'indiquer, dans un *Lexique* placé à la fin de l'ouvrage, toutes les synonymies que l'usage a consacrées. Ces synonymies sont extrêmement nombreuses et, de plus, il faut avouer qu'on a singulièrement abusé de la faculté de créer

(1) C'est ce que M. Lacroix a vérifié sur la sillimanite, qu'il a séparée d'un échantillon de fibrolite, où elle était associée à l'amphibole, au quartz, au feldspath, etc., ainsi que sur l'anorthite, variété indianite, qu'il a pu isoler d'une roche à pyroxène, grenat et épidote.

des noms spéciaux, pour désigner des variétés plus ou moins insignifiantes. Il serait grandement à désirer que la nomenclature minéralogique fût soumise à une revision sévère, prenant pour base les principes énoncés par Dana (1), savoir : 1° pour tout minéral analysé, il faut prouver, par un examen microscopique et chimique attentif, qu'on a bien affaire à une matière homogène ; 2° l'investigation approfondie qui sert à définir une nouvelle espèce doit *précéder* et non *suivre* l'application d'un nom nouveau.

Mais jusqu'à ce que cette revision ait été faite par ceux qui sont en possession de l'autorité nécessaire, nous ne pouvons nous dispenser de mentionner tous les noms qui ont été déjà publiés. C'est ce que nous avons essayé de faire dans le *Lexique*, en mettant à contribution les listes de MM. Dana, des Cloizeaux, de Selle, Pisani, Leymerie, Zirkel, Hintze, Lacroix, Chester, Spencer et les recueils périodiques relatifs à la minéralogie.

CHAPITRE II

DÉTERMINATION DES MINÉRAUX

Si l'analyse quantitative n'est pas, habituellement, du ressort de la minéralogie, qui en laisse le soin à la chimie, du moins il est indispensable que le minéralogiste possède des procédés, à l'aide desquels il puisse assez rapidement reconnaître les espèces déjà décrites et même soupçonner des espèces nouvelles. C'est sur ces procédés expéditifs qu'il convient d'arrêter un moment notre attention.

§ 1

CARACTÈRES PHYSIQUES

Caractères extérieurs. Densité. — Les premiers caractères qui doivent entrer en ligne de compte sont les *caractères physiques extérieurs* et, avant tout, la *forme cristalline*. A l'égard de celle-ci, de même que pour l'*examen optique*, devenu aujourd'hui une source si précieuse d'information, il y a lieu de se reporter aux deux premiers livres de ce Cours. Nous aurons d'ailleurs soin d'indiquer, dans la description des espèces, les principales combinaisons réalisées par chaque type important.

(1) *Third appendix to the 5th edition of Dana's mineralogy*, New-York, 1882.

Ensuite interviennent la considération de la *densité* et celle de la *dureté*. Pour cette dernière, nous n'avons rien à ajouter à ce qui a été dit précédemment (1). Quant à la densité, elle mérite quelques explications.

La *densité* des minéraux, qui se confond avec leur *poids spécifique*, si l'on prend le centimètre cube pour unité de volume et le gramme pour unité de poids, est souvent, quand on la combine avec les autres caractères extérieurs, un excellent moyen de lever l'incertitude qui pèse sur la détermination d'une espèce. Sa mesure s'effectue à l'aide de divers instruments, dont les uns permettent une évaluation très précise, tandis que les autres, d'un maniement rapide et facile, servent pour les cas où l'on peut se contenter de chiffres approchés.

Dans le procédé de la *balance hydrostatique*, on suspend, à l'aide d'un fil mince, le minéral à essayer à l'un des plateaux d'une balance et, après avoir fait équilibre dans l'autre plateau, ce qui donne le poids P du minéral dans l'air, on fait plonger le corps dans un vase rempli d'eau distillée.

Soit p le poids qu'il faut ajouter, après l'immersion, pour rétablir l'équilibre; p est justement le poids d'un volume d'eau égal au volume du minéral. Donc la densité cherchée est $\frac{P}{p}$. Pour aller plus vite, on peut, comme l'ont proposé A. Gadolin et M. Tschermak, remplacer les poids par un curseur, en transformant la balance en balance romaine, ou bien encore, comme dans la *balance de Jolly*, se servir d'un fil de fer en spirale, qui fait fonction de ressort et s'allonge plus ou moins le long d'une tige graduée.

La méthode la plus généralement usitée est celle du *Flacon* ou *Pycnomètre*. Cet instrument se compose d'un petit flacon de verre, fermé par un bouchon à l'émeri que traverse un canal étroit. Le poids ϖ du pycnomètre, plein d'eau distillée à une température qui doit toujours être la même, a été déterminé une fois pour toutes. Le minéral, en esquilles minces ou en poudre, est d'abord pesé dans l'air, ce qui donne son poids P, puis introduit dans le pycnomètre, qu'on emplit exactement avec de l'eau, de manière qu'il ne reste aucun vide, ce dont on s'assure en soumettant l'instrument à l'ébullition. Soit P′ le poids de l'appareil dans ces conditions. Ce nouveau poids se compose de ϖ, poids primitif du pycnomètre, plus P, poids du minéral, moins le poids α de l'eau expulsée par l'introduction de ce dernier; donc $\alpha = \varpi + P - P'$. Par suite, la densité cherchée est

$$\frac{P}{\varpi + P - P'}.$$

Enfin on s'est très souvent servi pour le même objet de l'*Aréomètre* de Nicholson, décrit dans tous les traités de physique. La nacelle supérieure est d'abord chargée du minéral à essayer, et l'on ajoute une tare suffisante pour

(1) V. plus haut, pp. 306 à 309.

que la tige verticale s'enfonce jusqu'en un point bien déterminé. Cela fait, on enlève le minéral, ce qui oblige, pour rétablir l'affleurement, à ajouter dans la nacelle un poids A, qui représente le poids du corps. Ensuite, retirant A, on place le minéral dans la nacelle inférieure immergée, et comme alors il subit une poussée égale au poids du liquide déplacé, il faut, de nouveau, ajouter sur la nacelle supérieure un poids α. Dès lors $\frac{A}{\alpha}$ représente la densité.

Séparation des espèces par ordre de densités. — Dans ces derniers temps, la différence de densité des minéraux a été employée avec succès pour l'analyse des roches à grain fin. On peut soumettre la poudre de roche à l'action d'un courant d'eau ascendant, de manière à opérer, au bout de quelque temps, une stratification conforme à l'ordre des poids spécifiques. Mais il est encore plus commode de se servir de liqueurs titrées. Ainsi M. Thoulet a recommandé l'emploi d'une dissolution de biiodure d'argent et de potassium, à laquelle on peut, par une addition d'eau convenable, donner toutes les densités possibles entre 1 et 3,196. Si, par exemple, on emploie la liqueur de densité égale à 2,60, l'orthose, dont le poids spécifique est 2,57, y surnagera, tandis que le quartz, dont le poids spécifique est 2,65, tombera au fond. Par ce moyen, quand on veut faire l'analyse d'un minéral qui paraît présenter des parties impures, on peut, après pulvérisation, obtenir pour l'essai une matière très homogène.

L'iodure de méthylène CH^2I^2 a une densité de 3,3, qui forme justement la limite entre les minéraux du pyroxène (3,3 à 3,6) et ceux de l'amphibole (3 à 3,3); mais ce liquide est cher et volatilisable. En le saturant par de l'iodoforme et de l'iode, on obtient une liqueur de 3,60 à 3,65, très fluide quoique opaque.

Quand il s'agit de l'analyse d'un minéral unique, au lieu de préparer à l'avance des liqueurs de divers titres, MM. Schaffgotsch et V. Goldschmidt emploient une dissolution concentrée, qu'ils amènent, par addition d'eau, jusqu'au point où le minéral ne tend plus ni à monter ni à descendre. A ce moment, la densité de la liqueur est déterminée à l'aide du pycnomètre (1).

Lorsque la densité des minéraux est voisine de 5, on peut recourir à l'emploi, indiqué par M. Klein, du tungstoborate de cadmium. Enfin, pour des minéraux très lourds, M. R. Bréon s'est servi du chlorure de plomb, soit seul, soit mélangé au chlorure de zinc et employé à la température de 400 degrés. Un tel mélange a permis de séparer le rutile du grenat.

Le tableau suivant fait connaître la série ascendante des poids spécifiques pour les espèces minérales les plus importantes (2) :

0,6 à	1,0	Pétrole, Ozocérite, Eau.
1,0 »	1,5	Résines, Houilles, Natron, Mirabilite.
1,5 »	2,0	Alun, Borax, Nitre, Salmiac, Mélantérie.

(1) Tschermak, *Lehrbuch*, p. 210.
(2) Tschermak, *Lehrbuch*, p. 209.

2,0 à	2,5	Gypse, Leucite, Zéolites, Graphite, Soufre.
2,5 »	2,8	Quartz, Feldspaths, Néphéline, Émeraude, Serpentine, Talc, Calcite.
2,8 »	3,0	Aragonite, Dolomie, Anhydrite, Trémolite, Mica.
3,0 »	3,5	Fluorine, Apatite, Hornblende, Augite, Péridot, Épidote, Tourmaline, Topaze, Diamant.
3,5 »	4,0	Sidérose, Malachite, Chessylite, Limonite, Corindon.
4,0 »	4,5	Barytine, Rutile, Chromite, Chalcopyrite, Blende.
4,5 »	5,5	Oligiste, Pyrite, Marcasite, Stibine, Panabase.
5,5 »	6,5	Magnétite, Cuprite, Mispickel, Chalcosine, Argent rouge.
6,5 »	8,0	Cérusite, Cassitérite, Galène, Argyrite.
8,0 »	10,0	Cinabre, Cuivre, Bismuth.
10,0 »	14,0	Argent, Plomb, Mercure.
15,0 »	21,0	Or, Platine.
21,0 »	23,0	Iridium.

Caractères physiques divers. — Quand la forme, la dureté et la densité d'un minéral ont été déterminées, il y a lieu de préciser sa *couleur* et son *éclat*. Ce dernier peut être *métallique* ou non, *vitreux* comme dans le quartz ou *gras* comme dans l'éléolite, *résineux* comme dans l'opale et l'asphalte, *cireux* comme dans la pyromorphite, *adamantin* comme dans le diamant, *nacré* comme dans la stilbite, *soyeux* comme dans le gypse fibreux.

Puis il convient d'indiquer si le minéral est fragile ou non et si sa cassure est *grenue*, *conchoïdale* (c'est-à-dire semblable à celle de certaines coquilles bivalves), *esquilleuse* ou *écailleuse* comme celle de l'agate, *plane* (dans le cas des clivages), *inégale*, etc. On doit aussi constater la présence ou l'absence de la *flexibilité*, de l'*élasticité*; enfin, s'il s'agit de minéraux à apparence métallique, il faut s'assurer s'ils sont *cassants*, *ductiles* ou même *sectiles*, c'est-à-dire susceptibles d'être coupés au couteau.

Un caractère de très grande importance est la *couleur de la poussière*. On en fait usage pour la détermination des minerais métalliques. En général il ne suffit pas, pour l'apprécier, d'écraser une parcelle de la substance sur une feuille de papier. Il vaut mieux la frotter contre un disque de porcelaine dégourdie, à la surface duquel elle laisse une trace, dont la couleur se reconnaît aisément.

Enfin on range sous la dénomination de caractères *organoleptiques* ceux qui se manifestent par le toucher, le happement à la langue, la saveur et l'odeur.

Certains minéraux (talc) sont *onctueux* et *gras*, tandis que d'autres sont simplement *doux au toucher* (amiante). Il y en a d'*âpres au toucher* (pierre ponce).

Les corps très avides d'humidité (magnésite, argiles) happent, c'est-à-dire adhèrent à la langue.

Quant aux saveurs, on les distingue en *acide*, *piquante* (sel ammoniac), *salée* (sel gemme), *fraîche* (nitre), *astringente* ou *styptique* (alun), *amère* (epsomite), *douce* (borax).

§ 2

ESSAIS PYROGNOSTIQUES

A. — *FUSIBILITÉ, ESSAIS DANS LES TUBES*

Chalumeau. Constitution de la flamme. — Lorsqu'on a tiré des caractères extérieurs tout ce qu'ils sont susceptibles de donner, il importe de soumettre le minéral qu'on veut déterminer à d'autres essais, dont les plus importants sont ceux de la *voie sèche* ou *essais pyrognostiques*. Tous ont pour objet d'étudier la manière dont se comporte, sous l'action de la chaleur, la matière d'essai, soit seule, soit mélangée à quelques réactifs simples.

On peut quelquefois se contenter de soumettre le minéral à la chaleur d'une lampe à alcool. Mais le plus souvent il est nécessaire d'activer la combustion à l'aide d'un courant d'air forcé. C'est ce qu'on réalise par le *chalumeau*, instrument trop connu pour qu'il soit besoin de le décrire ici (1). Nous rappellerons seulement les principes sur lesquels repose son action.

La flamme d'une bougie, celle dont on se sert le plus communément pour les essais au chalumeau, se compose de quatre parties : 1° une *base* d'un bleu sombre, formée de vapeurs qui brûlent à peine, parce qu'elles n'ont pas atteint une température suffisamment élevée; 2° un *cône intérieur obscur*, formé de vapeurs combustibles, qui ne brûlent pas encore, faute d'oxygène; 3° un second *cône lumineux* éclatant, où la combustion des hydrocarbures n'est que partielle et laisse subsister des particules de charbon, qui, demeurant en suspension dans la flamme, lui donnent son pouvoir éclairant; 4° un *cône extérieur* bleuâtre, très peu lumineux, où la combustion est complète, l'oxygène étant en excès, et où la température atteint son maximum. La flamme de ce cône est donc *oxydante*, tandis que celle du cône éclatant est *réductrice*. Le cône extérieur forme, tout autour de la flamme, une enveloppe extrêmement mince, dont l'épaisseur va en augmentant de la base au sommet.

Si l'on souffle en introduisant la pointe du chalumeau jusque dans l'intérieur du cône lumineux, on allonge la pointe du cône extérieur, produisant ainsi une *flamme oxydante* ou *feu d'oxydation*; si le chalumeau pénètre à peine dans la flamme, c'est le cône lumineux qui s'allonge et, en y plaçant la matière d'essai, on obtient une *flamme réductrice* ou *feu de réduction*.

Lorsqu'on peut avoir à sa disposition du gaz d'éclairage, on emploie avec avantage un bec dit *bec de Bunsen*, où la combustion complète du gaz est

(1) Consulter, en fait d'ouvrages spéciaux : Terreil, *Traité pratique des Essais au chalumeau* ; — de Kobell, *les Minéraux*; — Bruno Kerl et Jannettaz, *le Chalumeau*, etc.

obtenue par son mélange avec une quantité d'air suffisante. L'adaptation à ce bec d'un soufflet à pédale dispense l'opérateur de toute fatigue; il est vrai qu'on obtient moins facilement des dards réguliers qu'avec la flamme d'une bougie; mais on réalise des températures beaucoup plus élevées.

La meilleure flamme, pour l'usage du chalumeau, est celle de la lampe à huile de Plattner, avec mèche linéaire. L'alcool est un combustible très agréable, à cause de l'absence totale de fumée; mais il donne une flamme moins chaude que celle de la bougie. On peut augmenter beaucoup sa température en y mêlant de la térébenthine.

Étude de la fusibilité. — Le premier des essais pyrognostiques est celui qui a pour but l'étude de la fusibilité. La fusibilité se détermine d'ordinaire, soit avec la flamme d'une bougie, activée par le chalumeau, soit en exposant la matière à l'action du bord bleu de la flamme d'un bec de Bunsen. Le minéral, réduit en une mince esquille, est tenu à l'aide d'une pince de platine ou porté par la boucle d'un fil de platine. S'il a l'éclat métallique, il convient d'employer comme support un morceau de charbon.

L'échelle suivante, dressée par M. de Kobell, fait connaître les divers degrés de fusibilité au chalumeau :

1. Stibine; fond à la flamme simple de la bougie, sans souffler.
2. Mésotype fibreuse; fond facilement en boule sous l'action du chalumeau.
3. Grenat almandin; donne au chalumeau une petite sphère.
4. Actinote du Zillerthal; l'extrémité d'une mince esquille s'arrondit au chalumeau en formant comme une tête d'épingle.
5. Orthose; fond sur les arêtes et à l'extrémité des morceaux taillés en pointe fine.
6. Bronzite; même en écailles minces, laisse à peine apercevoir des traces de fusion.
7. Quartz; complètement infusible.

Bien entendu, les résultats seraient différents si l'on employait une flamme plus énergique; ainsi le chalumeau à gaz oxhydrique fond le platine, le quartz et la bronzite. Aussi doit-il être convenu que toutes les indications qui seront données, à l'occasion de la description des espèces, se rapporteront exclusivement à la flamme du chalumeau ordinaire.

Coloration de la flamme. — La flamme du chalumeau et celle du bec de Bunsen fournissent des données très précieuses, par les colorations momentanées qu'elles prennent, quand certains minéraux sont introduits dans le cône extérieur bleu, au voisinage de l'extrémité de la flamme réductrice.

Le tableau suivant fait connaître les couleurs développées par les minéraux les plus importants. Les chiffres de ce tableau, ainsi que ceux dont on accompagnera l'indication des réactions qui vont suivre, sont destinés à faciliter plus tard la description des espèces, en permettant d'indiquer les réactions par un simple numéro d'ordre.

(1)	Sels de Lithine	Rouge cramoisi.
(2)	» de Strontiane	» carmin.
(3)	» de Chaux.	» orangé.
(4)	» de Potasse	Violet pâle.
(5)	» de Soude	Jaune un peu rougeâtre.
(6)	» ammoniacaux	Violet bleuâtre.
(7)	Protochlorure de Mercure . .	» vif.
(8)	Sélénium et ses composés. . .	Bleu d'azur.
(9)	Tellure » . . .	» verdâtre.
(10)	Arsenic » . . .	» livide pâle.
(11)	Antimoine » . . .	» »
(12)	Plomb » . . .	» d'azur.
(13)	Chlorure de Cuivre	» pourpré.
(14)	Iodure de Cuivre.	Vert émeraude.
(15)	Composés du Phosphore . . .	» jaunâtre un peu livide.
(16)	Acide borique et borates . . .	» et vert jaunâtre.
(17)	Sels de Baryte.	» jaunâtre livide.
(18)	» de Cuivre.	» émeraude ou vert bleuâtre.

Pour que ces colorations se développent, il faut d'abord que la substance qui les produit soit engagée dans une combinaison volatile, ensuite qu'il n'y ait pas ensemble plusieurs corps dont les couleurs soient susceptibles de se modifier réciproquement ou de s'annuler. Lorsque la première condition n'est pas naturellement réalisée, on y peut satisfaire en traitant le minéral par l'acide chlorhydrique, par certains chlorures ou par l'acide sulfurique.

La coloration en bleu bordé de pourpre, que donne le chlorure de cuivre, est utilisée pour reconnaître la présence du chlore dans un minéral. Pour cela (19), après avoir fait, sur le fil de platine, une perle de sel de phosphore (voir plus loin) et l'avoir saturée de cuivre, on ajoute la matière d'essai et on porte le tout dans la flamme. Dans les mêmes conditions, les iodures (20) donnent une flamme d'un vert émeraude; avec les bromures, la coloration, moins nette, est d'un bleu verdâtre (21).

(22). Souvent plusieurs colorations se superposent et s'annulent réciproquement. Ainsi les minéraux sodifères colorent la flamme en jaune, ceux du potassium en violet blanchâtre. Mais quand les deux substances coexistent, la coloration du sodium efface absolument celle du potassium. Pour isoler cette dernière, on interpose, entre l'œil et la flamme, ou bien une dissolution peu concentrée d'indigo, de permanganate de potasse ou de bleu d'aniline, contenue dans un flacon à parois parallèles, ou, plus simplement, un verre coloré en bleu par le cobalt. Dans les deux cas, il y a absorption des rayons jaunes et le violet seul, ou plutôt le pourpre, apparaît.

Le verre bleu annule aussi presque complètement la coloration rouge de la lithine (qui au contraire se constate bien à l'œil nu), ainsi que celle de la chaux.

L'étude des colorations de la flamme doit se faire dans un endroit sombre. On peut d'ailleurs lui imprimer un plus grand degré de précision, en se servant du spectroscope. Le minéral en poudre est humecté, sur une feuille de

platine, avec un peu d'acide chlorhydrique ou d'acide sulfurique, ou, s'il est difficilement décomposable, comme c'est le cas des silicates, traité par un mélange de fluorure d'ammonium et d'acide sulfurique. Avec la boucle d'un fil de platine, on enlève une parcelle du mélange et on la porte vivement dans la partie externe de la flamme d'un bec de Bunsen, en mettant l'œil au spectroscope, après s'être préalablement familiarisé avec l'allure des divers corps simples. On peut aisément, par ce procédé, reconnaître la présence du Lithium, du Sodium, du Potassium, du Calcium, du Strontium, du Baryum, éventuellement celle du Cæsium, du Rubidium et de l'Indium.

M. Szabò a montré que la coloration de la flamme d'un bec de Bunsen, muni d'une cheminée de tirage, pouvait être employée à apprécier, non seulement la nature, mais encore la proportion relative des alcalis, potasse et soude, contenus dans une même espèce minérale. Pour cela il convient d'observer successivement : 1° dans la partie la moins chaude, à la base de la flamme; 2° vers le centre, à peu près en face de la pointe du cône intérieur. Bien entendu, on isole la coloration de la potasse à l'aide d'un verre de cobalt (1).

Essais dans le tube fermé. — Jusqu'ici nous avons supposé que la flamme agissait directement sur la substance à étudier. Mais il est des cas nombreux où il convient d'observer l'allure que prend cette dernière, quand elle est chauffée dans un tube ou un petit matras en verre.

Le tube peut être *fermé* à un bout ou *ouvert* aux deux bouts. Le tube ouvert s'emploie lorsqu'on veut étudier les phénomènes d'oxydation.

Le tube fermé, d'une longueur de 5 à 6 centimètres, avec un diamètre de 2 à 5 millimètres, étant soumis à la chaleur de la lampe à alcool, avec ou sans intervention du chalumeau, suivant les cas, on observe d'abord si le minéral, réduit à la grosseur d'un grain de millet, *décrépite*, comme font l'aragonite, la cérusite et plusieurs sulfures, s'il *se boursoufle*, s'il *fond*, se *désagrège*, devient *incandescent*, *phosphorescent* (cassitérite, fluorine), enfin s'il change de couleur.

Ainsi les oxydes d'étain et de zinc sont jaunes à chaud et blancs à froid; le peroxyde de fer est noir à chaud et rouge à froid, tandis que les oxydes du plomb passent, quand on les chauffe, du jaune au rouge brun. Un grand nombre de corps se décolorent définitivement : tels sont la tourmaline rouge, la fluorine rose, le zircon hyacinthe et la plupart des pierres bleues, saphir, apatite, fluorine, célestine, lapis, enfin le quartz enfumé et le grenat noir des Pyrénées. Quelques-uns changent de couleur pour toujours, comme la topaze jaune du Brésil, qui prend une teinte rose plus ou moins violacée (topaze brûlée). Les substances d'origine végétale se carbonisent. Enfin il est des corps qui reprennent, après refroidissement, la couleur que l'application d'une haute température leur avait momentanément enlevée. De ce nombre sont le rubis oriental, le rubis spinelle et le grenat pyrope, qui sont rouges à froid et verts à chaud.

(1) Voir la description du procédé dans Fouqué et Michel-Lévy, *Minéralogie micrographique*, p. 103.

A côté de ces phénomènes, il s'en produit d'autres non moins intéressants : ce sont les dégagements de vapeurs ou de gaz.

Tout corps contenant de l'eau à l'état de combinaison la perd à une température suffisamment élevée. Cette eau vient se condenser en gouttelettes près de l'extrémité froide du tube ; c'est ce qu'on exprime en disant que le minéral *donne de l'eau dans le tube* (23).

L'eau condensée peut être, dans certains cas, alcaline ou acide, ce dont on s'assure à l'aide du papier de tournesol ou de curcuma.

D'autres corps dégagent des gaz, tantôt inodores et incolores, tantôt colorés ou odorants. Enfin plusieurs substances donnent, par volatilisation, des produits qui viennent se condenser, dans la partie froide du tube, sous la forme d'anneaux de *sublimés*, dont la couleur est généralement caractéristique. Ainsi le sublimé du soufre (24) est jaune à froid ; celui de l'arsenic (25) est noir ou grisâtre et possède l'éclat métallique, tandis que le sublimé de l'acide arsénieux (26) est blanc ou peu coloré et celui du sulfure d'arsenic orangé (27) ; enfin le sélénium et le sulfure de mercure donnent des sublimés rouges à froid (28).

Les azotates se reconnaissent au dégagement de vapeurs rutilantes qui se produit quand on les chauffe avec du bisulfate de potasse (29).

Essais dans le tube ouvert. — Lorsqu'on traite un minéral dans le tube ouvert, on a soin, en général, que ce dernier soit légèrement coudé, de manière que le corps à essayer ne soit pas exposé à tomber, et on dirige le dard du chalumeau sur l'ouverture de la branche la plus courte du tube. Alors, sous l'influence de l'air introduit, il s'opère un grillage et les sulfures donnent lieu à un dégagement d'acide sulfureux, reconnaissable à son odeur (30), tandis que les séléniures dégagent de l'acide sélénieux, à odeur de raifort (31) ; l'arsenic et les arséniures produisent des sublimés, très volatils, d'acide arsénieux, à odeur d'ail (32), tandis que l'antimoine et les antimoniures donnent des sublimés blancs d'acides antimonieux, plus fixes, quoique susceptibles de cheminer dans le tube sous l'action du chalumeau (33). Enfin le tellure développe un sublimé fixe d'acide tellureux, fusible en gouttelettes, propriété qui appartient aussi à l'oxyde de bismuth (34).

Les tubes ouverts doivent être un peu plus longs que les tubes fermés ; leur usage est devenu moins fréquent, depuis qu'on a découvert des réactions simples, qui permettent de reconnaître certains corps volatils, dont ces tubes servaient autrefois à déceler la présence.

B. — *ESSAIS SUR LE CHARBON. EMPLOI DES RÉACTIFS*

Essais sur le charbon. — Au lieu de placer le minéral à essayer dans un tube de verre, on se sert très souvent d'un support de charbon. Le charbon a l'avantage d'être absolument infusible et de ne se combiner qu'avec l'oxygène. A ce titre, il pourrait agir comme réducteur ; mais cet effet se produit dans une

si faible mesure, qu'on peut la plupart du temps étudier sur le charbon l'action de la flamme oxydante aussi bien que celle de la flamme réductrice.

Le meilleur charbon est celui de pin ; il doit être bien cuit et sans gerçures. On le découpe d'ordinaire sous la forme d'un prisme carré, dont les faces bien dressées ont 2 ou 3 centimètres de largeur, et on creuse à sa surface, avec un canif, ou mieux encore avec une fraise d'acier, une petite cavité large de 5 à 10 millimètres, profonde de 3 à 4, pour recevoir la matière à essayer. Si cette dernière est pulvérulente, il est bon de l'humecter avant de souffler avec le chalumeau.

On observe si la substance est fusible, avec ou sans bouillonnement ; si elle décrépite, fuse ou déflagre ; si elle est entièrement absorbée par le charbon ; si elle dégage de la vapeur d'eau ou des *vapeurs odorantes*, comme les acides du soufre, de l'azote et du chlore ; si elle se volatilise ; si elle change de couleur ; si elle colore la flamme ; si elle donne naissance à des *culots métalliques* et si ces derniers sont *malléables* (**35**) (plomb), *cassants* (**36**) (bismuth, antimoine) ; s'il se produit des globules *magnétiques* (**37**) (oxydes de fer et certains composés de nickel et de cobalt) ; si la matière dégage des *fumées* épaisses et colorées ou non ; enfin si elle donne lieu à des *enduits* ou *auréoles*, situés plus ou moins près de la matière d'essai et quelle est la couleur de ces auréoles, à chaud ou à froid.

La production des auréoles accompagne en général celle d'un bouton métallique, dont elles représentent les produits d'oxydation. Elles sont *jaunes à chaud et à froid* (**38**) avec le plomb, le bismuth, le molybdène ; *jaunes à chaud et phosphorescentes*, mais *blanches à froid* (**39**) avec le zinc et l'étain ; *rouges* ou d'un *brun rouge* (**40**) avec le cadmium, le sélénium, l'argent.

Les auréoles ou les *enduits* de couleur blanche, dus à une oxydation, sont tantôt *fixes* (**41**), comme ceux du zinc et de l'étain, tantôt *volatilisables* (**42**), comme ceux de l'antimoine, de l'arsenic, qu'on peut ainsi promener à la surface du charbon ou faire disparaître en employant la flamme réductrice.

Emploi du carbonate de soude. Réaction du soufre. — Dans ce qui précède, nous avons toujours supposé que la matière à essayer était employée seule. Mais il est souvent utile de faire intervenir des *réactifs ;* les plus usités sont le *carbonate de soude*, vulgairement qualifié de *soude*, le *borax* et le *sel de phosphore*.

Le carbonate de soude est un *fondant réducteur*. On l'emploie anhydre ou hydraté ; mais il importe qu'il soit pur et entièrement privé d'acide sulfurique. On admet que la propriété réductrice du carbonate de soude est surtout mécanique, parce que cette substance, employée sur le charbon, y détermine un contact intime entre celui-ci et la matière d'essai, avec laquelle la soude a été intimement mélangée après pulvérisation. Mais l'action réciproque du carbone, du sodium et de l'azote peut aussi donner lieu à la production de cyanure de sodium, corps réducteur par lui-même.

Le carbonate de soude, sur le charbon, facilite beaucoup la formation des

globules métalliques. Avec les composés du fer, du nickel et du cobalt, il donne une masse attirable au barreau aimanté (43); mais son principal emploi est dans la recherche des *sulfures* et des *sulfates*, même à l'état de traces (44).

La matière à essayer est fondue sur le charbon avec 2 à 5 parties de carbonate de soude, sous l'action du feu réducteur. Souvent toute la masse, ou à peu près, passe dans le charbon; on gratte ce dernier avec un couteau et on écrase la poussière sur une lame d'argent imbibée d'eau ou sur un papier à filtre mouillé d'acétate de plomb; immédiatement des taches noires ou brunes montrent que le sulfure de sodium a été décomposé par l'eau, en dégageant de l'hydrogène sulfuré, qui a noirci le métal ou le papier.

Quand la masse fondue ne passe pas dans le charbon, elle prend une teinte brune qui rappelle celle du foie et reçoit, pour cette raison, le nom d'*hépar*. On dit alors que la substance *donne un hépar avec la soude.*

La soude peut aussi s'employer, seule ou avec du charbon, dans le tube fermé; mélangée avec un composé du mercure, elle détermine la volatilisation de ce dernier sous forme de gouttelettes métalliques, qui viennent se condenser près de l'orifice (45). Dans les mêmes conditions, les arséniates donnent un anneau noir d'arsenic métallique (46).

Souvent on emploie comme réducteur le cyanure de potassium; mais ce corps est fusible, déliquescent et d'un maniement dangereux.

Essais au borax. — Le *borax* ou *borate de soude hydraté* doit ses propriétés comme fondant à l'existence d'un excès d'acide borique, dans lequel les oxydes métalliques se dissolvent en produisant des perles diversement colorées. On l'emploie de la manière suivante :

Après avoir replié sur elle-même l'extrémité d'un fil de platine en formant une boucle de 2 à 3 millimètres de diamètre, on mouille cette boucle, ou encore on la porte au rouge, pour la plonger ensuite dans un flacon de borax bien pur. Le borax qui adhère au fil est d'abord simplement exposé à la flamme de l'alcool, où il fond avec boursouflement, en perdant son eau de cristallisation. Quand le bouillonnement a cessé, on souffle au chalumeau pour rendre la perle régulière et limpide et on l'applique, encore très chaude, sur la poudre à essayer, dont elle ne doit emporter qu'une très petite quantité. On recommence alors à souffler et, quand la dissolution est complète, on peut, d'un coup sec, faire tomber la perle vitreuse dans une capsule de porcelaine pour examiner sa coloration. Si cette dernière est trop intense, il suffit généralement, pour en apprécier la nuance, d'écraser la perle au marteau.

L'essai au borax ne doit être fait que sur des substances oxydées; les minerais sulfurés, arséniés, etc., donneraient avec le platine des alliages qui feraient fondre le fil. Aussi ces minerais doivent-ils être préalablement grillés sur le charbon. On peut aussi se servir comme support de coupelles, dites *coupelles de Le Baillif*, petites capsules en argile réfractaire, sur lesquelles le fondant s'étale bien, mais en donnant une teinte ordinairement moins vive que celle des perles

On n'obtient que des perles incolores avec les métaux suivants : cæsium, rubidium, potassium, sodium, lithium, thallium, baryum, strontium, calcium, magnésium, aluminium, glucinium, zirconium, thorium, yttrium, terbium, erbium, lanthane, zinc, étain, mercure. Avec l'or et le platine, la perle est incolore, mais laisse apercevoir le métal en suspension.

Quand les oxydes alcalino-terreux et ceux d'yttrium, de zirconium, de glucinium, de cérium, tantale et titane ne sont pas combinés à la silice, les perles vitreuses qu'ils donnent avec le borax deviennent d'un blanc de lait dit d'*émail* lorsqu'on les chauffe au *flamber*, c'est-à-dire lorsque, tenant le bout du chalumeau un peu en dehors de la flamme, on produit un dard très long et intermittent.

Voici l'indication des couleurs que donne le borax :

OXYDES	FEU D'OXYDATION		FEU DE RÉDUCTION	
	à chaud	*à froid.*	*à chaud*	*à froid*
(**47**) MANGANÈSE. .	Violet foncé (améthyste).	Violet foncé (améthyste).	Rose ou incolore.	Rose ou incolore.
(**48**) FER	Jaune rouille ou rouge brun.	Jaune clair ou incolore.	Vert sale.	Vert bouteille ou vert noir.
(**49**) CHROME . . .	Jaune verdâtre.	Vert jaunâtre.	Vert sale.	Vert émeraude.
(**50**) NICKEL. . . .	Rouge acajou ou jaune brun.	Jaune brun clair ou incolore.	Jaune gris.	Grise.
(**51**) COBALT . . .	Bleu intense.	Bleu de cobalt.	Bleu intense.	Bleu de cobalt.
(**52**) URANIUM. . .	Jaune orangé.	Jaune d'or.	Vert sale.	Verte.
(**53**) TITANE. . . .	Jaunâtre.	Jaunâtre.	Brun clair.	Brun violacé.
(**54**) VANADIUM . .	Jaune ou jaune brun.	Jaune clair.	Vert sale.	Vert émeraude.
(**55**) MOLYBDÈNE. .	Jaunâtre.	Incolore.	Brun clair transparente.	Brun foncé, opaque.
(**56**) TUNGSTÈNE. .	Jaune clair.	Incolore.	Incolore ou jaunâtre.	Jaune gris.
(**57**) ANTIMOINE . .	Jaune clair.	Incolore.	Grise.	Grise.
(**58**) PLOMB	Jaune clair.	Incolore.	Grise ou noire.	Grise ou noire.
(**59**) BISMUTH . . .	Jaune clair ou jaune rouille.	Incolore ou jaune clair.	Grise.	Grise.
(**60**) CUIVRE. . . .	Verte.	Bleu clair.	Vert sale.	Rouge opaque.
(**61**) ARGENT . . .	Jaune clair.	Jaune irisé.	Grise.	Grise.

Il est quelquefois très difficile d'obtenir directement un feu réducteur. Dans ce cas, on peut introduire dans la perle, soit de l'étain métallique, soit du sulfate de protoxyde de fer. Ce dernier n'est employé, à cause de sa coloration propre, que s'il s'agit du tungstène, du titane ou de l'antimoine. Avec le sel de fer, la perle de l'antimoine devient rouge-sang au feu de réduction (**62**).

Essais au sel de phosphore. — Le *sel de phosphore* est un phosphate hydraté de soude et d'ammoniaque, qui fond avec un fort bouillonnement, en donnant une perle claire de métaphosphate de soude. Il s'emploie comme le borax et donne des colorations plus vives, mais s'affaiblissant beaucoup plus par le refroidissement. C'est un bon réactif pour les silicates ; car il met la silice en liberté et celle-ci apparaît, dans le fondant vitrifié, à l'état de matière blanche opaque, qui garde souvent la forme de la matière d'essai ; c'est ce qu'on appelle donner un *squelette de silice*.

OXYDES	FEU D'OXYDATION		FEU DE RÉDUCTION	
	à chaud	*à froid*	*à chaud*	*à froid*
(63) MANGANÈSE. .	Violet foncé ou violet rouge.	Violet foncé ou violet rouge.	Rose ou incolore.	Rose ou incolore.
(64) FER	Rouge brun ou jaune rouille.	Jaune clair ou incolore.	Brun vert.	Vert bouteille ou vert noir.
(65) CHROME . . .	Violet sale.	Vert émeraude.	Vert sale.	Vert émeraude.
(66) NICKEL. . . .	Rouge acajou ou jaune brun.	Jaune brun clair ou incolore.	Jaune gris.	Grise.
(67) COBALT. . . .	Bleu intense.	Bleu de cobalt.	Bleu intense.	Bleu de cobalt.
(68) URANIUM. . .	Jaunâtre.	Vert jaune.	Vert sale.	Vert émeraude.
(69) TITANE. . . .	Jaune clair.	Incolore.	Violacée.	Violet clair.
(70) VANADIUM . .	Incolore ou jaune clair.	Incolore ou jaune clair.	Vert sale.	Vert émeraude.
(71) MOLYBDÈNE. .	Jaune verdâtre.	Verte.	Vert sale.	Vert émeraude.
(72) TUNGSTÈNE. .	Incolore ou jaune clair.	Incolore.	Gris bleu.	Bleu clair.
(73) ANTIMOINE . .	Jaune clair.	Incolore.	Grise.	Grise.
(74) PLOMB. . . .	Jaune clair.	Incolore.	Grise ou noire.	Grise ou noire.
(75) BISMUTH . . .	Jaune clair.	Incolore.	Grise.	Grise.
(76) CUIVRE. . . .	Verte.	Bleu clair.	Vert sale ou incolore.	Rouge opaque.
(77) ARGENT . . .	Jaunâtre.	Jaune irisé.	Grise.	Grise.

La manipulation du sel de phosphore exige quelques précautions, à cause de la grande quantité d'eau qu'il contient. Quand on le porte dans la flamme, à l'extrémité du fil de platine, il entre rapidement en fusion et se dissout si bien dans son eau de constitution que souvent la matière se détache du fil. En outre, en se desséchant, le sel de phosphore se boursoufle beaucoup et projette des gouttelettes chaudes. Aussi l'emploie-t-on quelquefois après fusion préalable ; mais il faut alors le conserver dans un flacon bien bouché.

Pour obtenir avec le sel de phosphore une coloration aussi intense que celle

que donnerait le borax avec le même oxyde, il faut en général employer une plus grande quantité de la matière d'essai.

Les sels doubles que l'acide phosphorique du sel de phosphore donne avec les oxydes métalliques ont généralement des couleurs caractéristiques. Les principales sont indiquées dans le tableau de la page 423 (1).

Réactifs divers. — On emploie encore, dans les essais au chalumeau, divers réactifs propres à faciliter la décomposition des minéraux. Nous avons déjà parlé de l'usage de l'*étain* métallique et du *cyanure de potassium* pour favoriser les réductions. L'*oxalate neutre de potasse* peut encore servir au même usage, car il dégage, lorsqu'on le chauffe dans le tube ou sur le charbon, du gaz oxyde de carbone, qui agit comme réducteur.

Au contraire, le *nitre* ou *salpêtre* est employé pour oxyder certaines substances, telles que celles qui renferment du chrome ou du manganèse.

Quelques réactifs ont spécialement pour objet de décomposer la matière d'essai et de mettre en liberté des corps solides ou volatils, doués de propriétés caractéristiques.

Ainsi le *sulfate acide* ou *bisulfate de potasse*, agissant par son excès d'acide sulfurique, décompose les sulfures, titanates, tungstates, en même temps qu'il expulse de certains minéraux le brome, l'iode, le fluor, l'acide borique, le lithium.

Le *fluorure de calcium* ou *spath fluor*, mêlé au réactif précédent, aide à reconnaître, par la coloration de la flamme, la lithine et l'acide borique.

L'*azotate de cobalt* hydraté, rose quand il est convenablement étendu d'eau, perd, lorsqu'on le chauffe avec certains corps, au feu oxydant et sur le charbon, tout son acide azotique. L'oxyde de cobalt mis en liberté forme avec les oxydes métalliques des combinaisons colorées.

Avec les phosphates, borates et silicates alcalins, on obtient des perles transparentes, colorées en bleu (**78**). La couleur est noirâtre avec la baryte, la strontiane et la chaux (**79**); rose très clair, après entier refroidissement, avec la magnésie (**80**); d'un beau bleu avec l'alumine (**81**); violet gris avec la glucine (**82**); noir violacé avec la zircone (**83**); vert jaunâtre par l'acide titanique (**84**); d'un très beau vert avec les sels de zinc (**85**); d'un vert bleuâtre par les oxydes d'étain (**86**).

C. — *ESSAIS SPECTROSCOPIQUES ET RADIOGRAPHIQUES*

Essais spectroscopiques. — L'analyse qualitative des minéraux au spectroscope a été particulièrement développée, dans ces dernières années, par M. A. de Gramont (2). Ce mode d'examen s'applique à tous les minéraux qui sont assez bons conducteurs pour qu'on puisse obtenir une étincelle électrique

(1) Voir Terreil, *op. cit.* — (2) *Bull. soc. minéralog.*, XVIII, p. 171.

entre leurs fragments. Ceux-ci, maintenus par des pinces à bouts de platine, sont placés en regard et mis en communication avec un condensateur. Ce dernier est formé de plusieurs bouteilles de Leyde, que charge une bobine d'induction. L'étincelle, ainsi condensée, dissocie les éléments et donne des spectres à lignes très vives.

Le spectroscope employé était à vision directe et à deux prismes composés, donnant, entre les deux raies D, un écartement égal à une division du micromètre. L'erreur pouvait être ainsi réduite à un dixième de micron.

Non seulement les métaux, mais aussi les métalloïdes, donnent des raies dans l'étincelle condensée. Si l'on supprime le condensateur, les spectres des métalloïdes disparaissent, et ceux des métaux se réduisent aux lignes les plus brillantes. Les minéraux non conducteurs, mais volatilisables dans l'étincelle, fournissent aussi de bons résultats par cette méthode. C'est le cas de la plupart des chlorures. Du reste, les minéraux non conducteurs développent aussi des spectres quand, après pulvérisation et fusion avec un carbonate alcalin, on les soumet à l'action de l'étincelle condensée.

En photographiant les spectres des minéraux, M. de Gramont a obtenu des résultats qui lui permettent d'espérer que, jusqu'à un certain point, la méthode pourra fournir des indications quantitatives; ainsi pour la proportion d'argent contenue dans une galène.

Essais radiographiques. — Les rayons Röntgen sont susceptibles d'applications en minéralogie (1). Le diamant, par sa transparence, se laisse facilement distinguer de toutes ses imitations. Même dans des pierres épaisses, on peut reconnaître des inclusions invisibles à la loupe : ainsi des inclusions de pyrite dans une opale de 2 millimètres d'épaisseur.

§ 3

ESSAIS PAR VOIE HUMIDE

Action de l'acide chlorhydrique. — Il est un certain nombre de réactions de la voie humide qui, par leur simplicité, peuvent rendre de grands services dans la détermination rapide des espèces. Aussi convient-il de rappeler ici les plus caractéristiques (2).

En général, avant toute chose, il est bon d'essayer l'action des acides, en commençant par l'acide chlorhydrique. La matière, pulvérisée dans le mortier, est introduite au fond d'une petite éprouvette de verre, d'environ 1 centimètre de diamètre et de 14 à 20 centimètres de longueur. On verse de l'eau et, avec une baguette de verre, on agite fortement, pour chasser les bulles d'air qui

(1) Dœlter, *Bull. soc. minéralog.*, XIX, p. 88. — (2) Voir aussi Pisani, *Traité élémentaire de Minéralogie*, et Tschermak, *Lehrbuch*.

auraient pu rester adhérentes à la matière d'essai ou aux parois du verre. On ajoute l'acide chlorhydrique un peu étendu, qu'on laisse agir, d'abord à froid et ensuite, si cela est nécessaire, en chauffant graduellement.

Tantôt la matière est complètement inattaquable; tantôt elle se dissout en totalité ou en partie. Dans le second cas, il y a lieu de remarquer si la substance *fait effervescence* (87) sans odeur, ce qui est la marque certaine des carbonates; mais cette effervescence peut ne se produire qu'à chaud et, tandis que plusieurs carbonates font effervescence, même en assez gros fragments, d'autres ont besoin d'être préalablement pulvérisés.

Quelques sulfures, dans ces conditions, dégagent de l'hydrogène sulfuré; divers composés du manganèse mettent en liberté du chlore. Quant aux silicates, il en est qui sont attaqués avec formation de silice *gélatineuse* (88), tandis qu'avec d'autres la silice qui se sépare reste *pulvérulente* (89).

Si l'acide chlorhydrique étendu n'a pas suffisamment agi, on emploie l'acide concentré; pour s'assurer qu'il y a eu attaque, il suffit d'étendre d'eau et d'ajouter de l'ammoniaque et du phosphate de soude; l'absence de tout précipité est un indice sûr que la matière est restée intacte.

Action des acides azotique, sulfurique et phosphorique. — La substance qui a essuyé l'action de l'acide chlorhydrique doit être traitée ensuite par l'acide azotique. Ce dernier attaque les sulfures, les arséniures et les métaux natifs, en dégageant des vapeurs rutilantes. On peut ensuite faire intervenir l'eau régale et enfin l'acide sulfurique, qui permet de reconnaître les fluorures (90). Pour cela, on emploie un creuset de platine, dont le couvercle porte un trou, au-dessus duquel on place une petite lame de verre. La matière, mélangée d'acide sulfurique, étant chauffée légèrement, il se dégage des vapeurs d'acide fluorhydrique, qui attaquent le verre et le dépolissent.

Les tellurures se reconnaissent à la liqueur pourpre ou hyacinthe qu'ils donnent à chaud avec l'acide sulfurique (91); cette liqueur se décolore par addition d'eau, avec formation d'un précipité gris noir de tellure.

L'acide phosphorique sirupeux sert à reconnaître l'acide tungstique et le manganèse. Avec les tungstates, l'application d'une chaleur modérée donne un sirop d'un bleu foncé, qui se décolore par addition d'eau, mais dont la teinte reparaît quand on fait intervenir l'étain ou le fer en poudre (92). Les minerais de manganèse donnent un sirop, d'un blanc violet si le métal est à l'état de peroxyde ou de sesquioxyde (93), incolore et devenant violet par addition de l'acide azotique, si la manganèse est à l'état de protoxyde (94).

Les minéraux sur lesquels les acides sont restés sans action doivent être fondus, soit avec le carbonate de soude dans un creuset de platine, soit avec la potasse dans un creuset d'argent. Quelques-uns ne se rendent qu'après fusion au bisulfate de potasse et les composés de carbone demandent à être fondus avec le nitre, qui les transforme en carbonate de potasse.

Réactions diverses. Métalloïdes. — Les *sulfates* en dissolution se

reconnaissent au précipité blanc, insoluble dans les acides, qu'ils donnent avec le chlorure de baryum ou l'azotate de baryte (95).

Les *phosphates*, dissous dans l'acide chlorhydrique ou l'acide azotique, se colorent en jaune quand on les traite à chaud par une solution de molybdate d'ammoniaque, saturée d'acide azotique; bientôt il se produit un précipité jaune très ténu (96). On peut aussi, dans la dissolution qui renferme les phosphates, introduire du sel ammoniac et de l'ammoniaque liquide, après quoi l'addition de sulfate de magnésie donne un précipité cristallin, décomposable par les acides (97).

Les *chlorures*, dissous dans l'eau ou l'acide nitrique étendu, donnent, par addition de nitrate d'argent, un précipité blanc, caillebotté, de chlorure d'argent, noircissant à la lumière et soluble dans l'ammoniaque, tandis qu'un excès d'acide ne le dissout pas (98).

Quant aux *tellurures*, nous avons déjà parlé de la liqueur pourpre qu'ils donnent, lorsqu'on les chauffe doucement avec l'acide sulfurique concentré.

Les *iodures*, chauffés dans un matras avec de l'acide sulfurique, dégagent des vapeurs d'iode, qui bleuissent le papier d'amidon (99), tandis que, dans les mêmes circonstances, les *bromures* colorent le papier en jaune et seulement au bout de plusieurs heures (100).

Réactions diverses. Métaux. — Les sels de *potasse* (sulfates, carbonates, phosphates, azotates, chlorures, sels organiques) précipitent en jaune (1) lorsqu'on les traite, en présence de l'hyposulfite de soude, par une solution chlorhydrique de sous-nitrate de bismuth (101).

Quand la potasse est à l'état de chlorure, elle donne, après addition de chlorure de platine, un précipité jaune citron (102).

Les sels de *chaux*, en dissolutions saturées d'ammoniaque, donnent par l'oxalate d'ammoniaque un précipité blanc, soluble dans les acides chlorhydrique et azotique, mais insoluble dans l'acide acétique (103). Si la liqueur donne déjà un précipité par l'ammoniaque, il convient de filtrer, après addition de sulfhydrate d'ammoniaque; alors seulement on emploie l'oxalate. En présence de l'acide phosphorique, l'existence de la chaux doit se constater par le précipité blanc, soluble dans un excès d'eau, que donne l'acide sulfurique, pourvu que la liqueur soit concentrée ou alcoolique (104).

Les sels de *strontiane* précipitent en blanc, au bout de quelque temps, par une dissolution de sulfate de chaux (105). Avec les sels de *baryte*, le précipité est immédiat (106) et, de plus, ces sels donnent un précipité cristallin incolore avec l'acide hydrofluosilicique (107), tandis que ceux de strontiane n'en donnent pas.

La *magnésie*, en solution acide, additionnée d'ammoniaque, doit être traitée par le chlorhydrate, puis le sulfhydrate, enfin l'oxalate d'ammoniaque; après

(1) Carnot, *Comptes rendus*, LXXXIV, p. 391.

avoir filtré, on ajoute du phosphate de soude, qui fait naître un précipité cristallin de phosphate ammoniaco-magnésien (108).

L'*alumine*, traitée par l'ammoniaque, abandonne un précipité blanc floconneux, qui se dissout dans un excès de potasse, mais qui précipite de nouveau par le carbonate d'ammoniaque (109). L'addition de potasse, suivie de filtration, est nécessaire quand il y a du fer dans la dissolution.

La *glucine* fournit aussi, avec l'ammoniaque, un précipité blanc (110); mais ce dernier se dissout aussi bien dans la potasse que dans le carbonate d'ammoniaque.

Les sels de *fer* en dissolution, chauffés pendant quelque temps avec l'acide azotique, donnent, par le ferrocyanure de potassium, un précipité bleu (111); si l'on ajoute un excès d'ammoniaque, on obtient, avec les sels de peroxyde, un précipité rouge brun, gélatineux (112) et, avec les sels de protoxyde, un précipité verdâtre, devenant rouge brun au contact de l'air (113).

Les solutions azotiques de *nickel*, ordinairement vertes (à moins qu'il n'y ait une certaine quantité de cobalt, auquel cas la liqueur est de couleur topaze), donnent, par la potasse, un précipité vert pomme (114). Avec l'ammoniaque en excès, les mêmes solutions donnent une liqueur d'un bleu foncé, laquelle, traitée par un excès de sulfhydrate d'ammoniaque, forme un précipité noir, en partie soluble dans le réactif; après filtration, la liqueur devient brune (115).

En fondant avec du nitre les composés du *chrome*, on obtient un produit qui, traité par l'eau, fournit une liqueur jaune, où l'acétate de plomb fait naître un précipité jaune de chromate de plomb (116).

Fondus avec la soude et traités ensuite par l'eau, les composés du *tungstène* donnent une liqueur d'où l'acide chlorhydrique précipite en blanc l'acide tungstique (117).

Le *bismuth*, en dissolutions très étendues, précipite en blanc par une goutte d'eau salée (118).

L'*antimoine*, transformé en oxyde par l'acide azotique, puis décanté et lavé, étant traité par du sulfhydrate d'ammoniaque en excès, donne une liqueur où une évaporation doucement conduite fait naître un précipité orangé de sulfure d'antimoine (119).

Les minéraux du *titane*, attaqués par l'acide chlorhydrique concentré (au besoin après fusion avec l'hydrate de potasse), fournissent une liqueur qui devient violette quand elle a été chauffée avec de l'étain en feuilles (120). L'addition d'eau fait passer la teinte au rose.

Les solutions de *zinc* donnent, avec la potasse ou l'ammoniaque, un précipité blanc, gélatineux, qui se dissout dans un excès de réactif. La même liqueur, traitée par l'hydrogène sulfuré, abandonne un précipité blanc de sulfure de zinc (121).

Les solutions acides contenant du *cadmium* donnent, avec l'hydrogène sulfuré, un précipité jaune citron, insoluble dans le sulfhydrate d'ammoniaque (122).

Les solutions azotiques de *plomb* précipitent en blanc par l'acide sulfurique (123); avec l'acide chlorhydrique, le précipité est blanc, cristallin et soluble dans l'eau bouillante (124). Avec le chromate de potasse, on obtient un précipité jaune (125).

Les solutions de *cuivre*, traitées par l'ammoniaque en excès, deviennent d'un beau bleu (126). Lorsqu'on y introduit une lame de fer, elles abandonnent du cuivre métallique (127).

L'*argent*, dissous dans l'acide azotique, donne par l'acide chlorhydrique un précipité blanc, caillebotté, qui noircit à l'air et se dissout dans l'ammoniaque (128).

Analyses microchimiques. — A la suite de ces réactions classiques, il convient de mentionner le procédé imaginé par M. Boricky, pour l'analyse qualitative des silicates à l'aide de l'acide hydrofluosilicique. Beaucoup de silicates, notamment dans le groupe des feldspaths, peuvent être distingués spécifiquement les uns des autres, si l'on parvient à déterminer quelle est celle des bases, potasse, soude ou chaux, qui y domine. Quand la substance à essayer ne se présente qu'en très minime quantité, par exemple comme partie constituante d'une plaque mince étudiée au microscope, il faut pouvoir la soumettre à un essai *microchimique*; c'est à quoi répond bien le procédé Boricky.

Un fragment de la substance, à peine gros comme une tête d'épingle, est fixé sur une lame de verre par du baume de Canada. On le recouvre d'une goutte d'acide hydrofluosilicique et on laisse l'attaque se prolonger pendant 24 heures dans l'air humide, par exemple sous une cloche renfermant une soucoupe pleine d'eau. Ensuite on porte la lame sous une autre cloche remplie d'air desséché par du chlorure de calcium. Quelques heures suffisent pour faire cristalliser les hydrofluosilicates résultant de l'attaque, et il n'y a plus qu'à les porter sous l'objectif du microscope.

L'hydrofluosilicate de *potasse* cristallise en *cubes* (129), celui de *soude* en *prismes hexagonaux* (130), et celui de *chaux* donne lieu à de nombreuses formes dyssymétriques, arborisations, fuseaux renflés au centre, etc. (131).

Cette analyse microchimique peut être employée avec d'autres acides, quand la nature du minéral le permet. Un minéral qui contient de la chaux, attaqué par l'acide sulfurique, laisse voir, après dissolution et évaporation, des cristaux et aiguilles microscopiques de gypse, reconnaissables à leurs formes (132).

Les sels de magnésie, traités par le sel de phosphore et l'ammoniaque, donnent des cristaux très caractéristiques de phosphate ammoniaco-magnésien, le plus souvent échancrés et comme entaillés (133).

Enfin une dissolution sulfurique d'alumine, mise en contact avec un grain de chlorure de cæsium, donne de jolis cristaux octaédriques d'alun de cæsium (134).

Les recherches microchimiques se sont surtout développées depuis 1877, époque où M. Boricky a fait connaître la production des petits cristaux que l'acide hydrofluosilicique engendre en attaquant les minéraux. Les principaux

progrès, dans cet ordre de recherches, sont dus à MM. Behrens, Streng, Haushofer, O. Lehmann, Renard et Klement (1). M. Behrens employait surtout des dissolutions sulfatées, et M. Streng des solutions chlorurées, des minéraux à examiner.

Les sels de potasse se reconnaissent aux cristaux, octaédriques et franchement jaunes, de chloroplatinate de potassium, que le chlorure de platine fait naître dans les solutions neutres ou faiblement acides. Avec les sels de sodium, l'évaporation d'une gouttelette d'acétate d'uranyle concentré produit de petits cristaux tétraédriques d'un acétate double d'uranyle et de sodium. Dans les sels de lithium, le phosphate de soude détermine des cristallisations prismatiques et étoilées.

Pour le succès de ces opérations, il importe qu'aussitôt après l'addition du réactif à la goutte de solution de la substance, placée sur une lame de verre, le

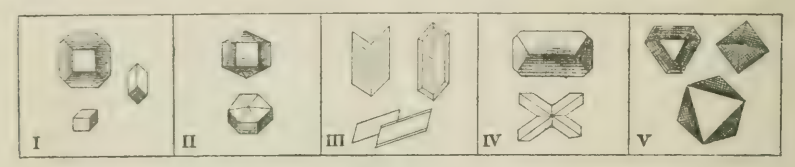


Fig. 372.

porte-objet (chauffé au besoin par une capsule d'eau bouillante) soit introduit sous le microscope ; car au bout de quelque temps, tout cristallise sous forme d'arborisations, qui masquent les cristaux caractéristiques du début de la réaction.

La figure 372 reproduit un certain nombre des cristaux obtenus par les réactions microchimiques, savoir : I, fluosilicate de potasse ; II, fluosilicate de soude ; III, sulfate de chaux (gypse) ; IV, phosphate ammoniaco-magnésien ; V, alun de cæsium.

Résumé. — Pour faciliter la connaissance des essais, tant pyrognostiques que chimiques, qui peuvent conduire à la détermination des éléments, nous énumérerons ceux-ci, ou du moins les principaux d'entre eux, par ordre alphabétique, en indiquant, à la suite de chacun, le numéro des réactions qui s'y rapportent :

Aluminium, 81, 109, 134.
Ammonium, 6.
Antimoine, 11, 33, 36, 42, 57, 62, 73, 119.
Argent, 40, 61, 77, 128.
Arsenic, 10, 25, 26, 27, 32, 42, 46.
Azote, 29.
Baryum, 17, 79, 106, 107.
Bismuth, 34, 36, 38, 59, 75, 118.
Bore, 16, 78.
Brome, 21, 100.
Cadmium, 40, 122.
Cæsium, 134.
Calcium, 3, 79, 103, 104, 131, 132.
Carbone, 87.
Chlore, 19, 98.
Chrome, 49, 65, 116.

(1) Voir *Réactions microchimiques à cristaux*, par C. Klement et A. Renard, Bruxelles, 1886.

Cobalt, 37, 43, 51, 67.
Cuivre, 13, 14, 18, 60, 76, 126, 127.
Étain, 39, 41, 86.
Fer, 37, 43, 48, 64, 111, 112, 113.
Fluor, 90.
Glucinium, 82, 110.
Hydrogène (à l'état d'eau), 23.
Iode, 20, 99.
Lithium, 1.
Magnésium, 80, 108, 133.
Manganèse, 47, 63, 93, 94.
Mercure, 7, 28, 45.
Molybdène, 38, 55, 71.
Nickel, 37, 43, 50, 66, 114, 115.
Phosphore, 15, 78, 96, 97, 133.
Plomb, 12, 35, 38, 58, 74, 123, 124, 125.
Potassium, 4, 22, 101, 102, 129.
Sélénium, 8, 31, 40.
Sodium, 5, 130.
Soufre, 24, 30, 44, 95.
Strontium, 2, 79, 105.
Tellure, 9, 34, 91.
Titane, 53, 69, 84, 120.
Tungstène, 56, 72, 92, 117.
Uranium, 52, 68.
Vanadium, 54, 70.
Zinc, 39, 41, 85, 121.
Zirconium, 83

CHAPITRE III

CLASSIFICATION DES ESPÈCES

§ I

APERÇU DES DIVERSES CLASSIFICATIONS

Classifications anciennes. — Le nombre des espèces est si considérable, en minéralogie, qu'il est absolument nécessaire de les grouper en familles offrant certains caractères communs. On peut procéder à ce groupement, tantôt en se fondant sur les analogies naturelles de gisement ou de composition des espèces, tantôt en donnant la prééminence à certains caractères faciles à reconnaître, en vue de rendre les déterminations plus rapides. On établit ainsi des classifications, soit *naturelles*, soit *artificielles* (1).

La plus ancienne de toutes les classifications est celle de Werner (1792-1798). Elle comprend quatre classes : 1° *terres et pierres*; 2° *sels*; 3° *combustibles*; 4° *métaux*. Chaque classe est partagée en genres d'après la composition chimique, et les genres eux-mêmes sont composés d'espèces, soit isolées, soit groupées en familles. La place d'une espèce est déterminée, tantôt par l'élément *prédominant* ou le plus abondant, tantôt par l'élément *caractéristique*, c'est-à-dire celui qui influe le plus sur ses caractères physiques. Aussi la méthode de Werner peut-elle être considérée comme essentiellement éclectique.

Mohs, successeur de Werner, a établi une classification uniquement fondée sur les caractères physiques, savoir : la densité, la dureté, la saveur, etc. Nous ne ferons que mentionner cette méthode, qui offre à nos yeux le tort irrémissible de réunir dans une même classe les pierres et les métaux.

(1) Consulter, sur ce sujet, le *Cours de Minéralogie* de Leymerie, 3e édit., II, p. 1.

La classification de Berzélius a pour unique base le caractère chimique. Il est très rare, dans la nature, que les substitutions conformes à la loi de l'isomorphisme portent sur l'élément minéralisateur ou *électronégatif* (1), tandis qu'elles sont fréquentes sur l'élément minéralisable ou *électropositif*. C'est pourquoi, après avoir partagé les minéraux en deux grandes classes, celle des corps composés *à la manière des substances organiques* et celle des minéraux composés *à la manière des substances inorganiques*, Berzélius avait divise la dernière, de beaucoup la plus nombreuse, en 18 familles, ayant chacune pour caractéristique un des 18 corps simples les plus électronégatifs. L'un des inconvénients de cette méthode était de former des groupes très disparates, beaucoup de familles n'ayant guère que deux espèces chacune, tandis que celle de l'oxygène renfermait toutes les pierres et la plupart des minerais.

La méthode d'Haüy (1800-1822) comporte une division en quatre classes : 1° *acides libres*; 2° *substances métalliques hétéropsides*, avec un appendice contenant la silice et les silicates; 3° *substances métalliques autopsides* (métaux et minerais, ductiles ou non ductiles); 4° *substances combustibles non métalliques*.

En 1824 et en 1830, Beudant distribua les minéraux en trois classes, dont la première contient à elle seule les six septièmes des espèces : 1° *gazolites*, c'est-à-dire minéraux ayant pour principe minéralisateur un corps liquide ou solide, susceptible de former un gaz permanent par sa combinaison avec l'oxygène, l'hydrogène ou le fluor; 2° *leucolites* ou minéraux qui donnent, avec les acides, des dissolutions blanches (antimonides, aluminides, etc.); 3° *chroïcolites* ou minéraux dont les dissolutions sont colorées (sidérides, cobaltides, cuprides, etc.).

La classification de Dufrénoy (1844) répartit les espèces en six classes : 1° *corps simples*; 2° *alcalis*; 3° *terres alcalines et terres*; 4° *métaux*; 5° *silicates*; 6° *combustibles d'origine organique*. Quant à celle de Delafosse (1860), après une division en trois classes, *combustibles non métalliques*, *combustibles métalliques* et *non combustibles*, elle groupe les espèces en ordres, caractérisés par l'élément minéralisateur; ainsi, dans la troisième classe, les *oxydes métalliques* et les *oxydes terreux*, ou *lithoïdes*, les *haloïdes*, etc.

Classifications modernes. — Leymerie (1859-1867), après avoir discuté les classifications précédemment usitées, s'est prononcé en faveur de l'application de la méthode *éclectique* ou *wernérienne*. Ayant formé d'abord deux grandes divisions, celle des minéraux *inorganiques* et celle des minéraux *organiques* (la dernière comprenant les haloïdes [mellite], résines, stéarines, bitumes, charbons), l'auteur établit dans la première les subdivisions suivantes :

1° *Gaz*; 2° *halides* (haloïdes et sels), minéraux liquides à la température ordinaire et pourvus de saveur; 3° *pierres*, formant l'ordre des *haloïdes* et celui

(1) Lorsqu'une combinaison binaire vient à être détruite par l'électricité, l'un des éléments se porte au pôle positif, l'autre au pôle négatif de la pile. Comme les électricités de nom contraire s'attirent, on dit alors que le premier corps est *électronégatif* et le second *électropositif*. Les vrais métaux sont électropositifs.

des *pierres* proprement dites ; 4° *métaux*, avec autant de genres qu'il y a de métaux minéralisés.

Des Cloizeaux a simplement rangé les espèces en quarante familles, décrites d'après le rang que leur type occupe dans la classification chimique de Berzélius, *hydrogénides*, *silicides*, *borides*, *carbonides*... *platinides*, *osmiides*, *aurides*. L'arrangement de la famille si nombreuse des silicates est conforme au *Tableau minéralogique* de M. Adam, c'est-à-dire qu'on décrit d'abord les silicates anhydres de sesquioxydes, puis les silicates hydratés de même ordre ; ensuite les silicates, anhydres et hydratés, de protoxydes ; les silicates anhydres et hydratés, contenant ensemble les deux espèces de bases ; enfin ceux où l'on rencontre d'autres éléments électronégatifs, fluor, soufre, chlore, etc.

M. Zirkel (1) a divisé les minéraux en six classes : 1° *éléments simples* ; 2° *sulfures* et composés analogues ; 3° *oxydes* ; 4° *sels haloïdes* ; 5° sels oxydés ou *oxysels* ; 6° *composés organiques* et produits de leur décomposition. La cinquième classe, de beaucoup la plus nombreuse, contient 14 familles, parmi lesquelles figure celle des silicates.

Dans ces derniers temps, les progrès de la chimie atomique ont amené à grouper les éléments simples en séries naturelles, dont on a tiré parti pour la classification des minéraux. Sur ce principe est fondée la méthode de J.-D. Dana (2). Les éléments ayant été répartis en trois séries, l'auteur a établi six grands groupes, dont le premier comprend les éléments natifs et le dernier les minéraux d'origine organique, les autres étant caractérisés par les séries auxquelles appartiennent les éléments les plus électronégatifs.

La classification développée par M. Tschermak, dans son *Lehrbuch*, est également fondée sur les analogies naturelles des éléments simples, telles qu'elles ont été interprétées par MM. L. Mayer et Mendélejeff, qui ont réparti les éléments en huit séries, selon les rapports de leurs poids atomiques.

Les minéraux y sont rangés en neuf grandes classes, savoir :

I. *Éléments*. Métalloïdes et métaux natifs.
II. *Lamprites*. Combinaisons des éléments des séries 5 et 6 (à l'exception de l'oxygène) avec les métaux (sulfures, arséniures, sulfosels, etc.).
III. *Oxydes*, simples et hydratés.
IV. *Spinélotypes*. Combinaisons déduites des hydroxydes de la 3e série (aluminates, borates).
V. *Silicotypes*. Sels formés par les acides oxygénés de la 4e série (carbonates, silicates, hydrosilicates, titanates).
VI. *Nitrotypes*. Sels formés par les acides oxygénés de la 5e série (tantalates, phosphates, nitrates, etc.).
VII. *Gypsotypes*. Sels formés par les acides oxygénés de la 6e série (sulfates, chromates, tungstates, etc.).
VIII. *Halites*. Composés non oxygénés des éléments de la 7e série avec les autres (chlorures, fluorures).
IX. *Anthracides*. Composés du carbone avec hydrogène et avec ou sans oxygène (résines, houilles, bitumes, etc.).

(1) *Elemente* de Naumann, éditions de 1877 et de 1885. — (2) *System of Mineralogy*, 1875.

§ 2

MÉTHODE SUIVIE DANS CET OUVRAGE

Inconvénients des méthodes usitées. — Aucune des méthodes de classification qui viennent d'être énumérées ne nous a paru offrir des avantages assez marqués pour que son adoption s'imposât à nous. Sans méconnaître l'importance de l'argument chimique, prédominant dans chacune d'elles, on ne saurait manquer d'être frappé du défaut absolu de proportion entre les groupes de divers ordres, ainsi que des associations contre nature auxquelles conduit parfois l'emploi exclusif du caractère chimique. Ainsi, tandis que les silicates sont, de beaucoup, les minéraux les plus répandus dans l'écorce du globe, tantôt on les voit former une simple famille, à l'égal des hydroxydes, qui ne sont représentés que par une seule espèce; tantôt ils apparaissent comme une sorte d'annexe d'un groupe, dont le nom ne laisse même pas deviner qu'ils puissent lui appartenir. Ici la willémite ou silicate de zinc anhydre est décrite à côté du péridot et de l'enstatite, tandis que, beaucoup plus loin, la calamine, ou silicate de zinc hydraté, séparée d'ailleurs de tous les autres minerais de zinc, se trouvera mentionnée à la suite de la serpentine. Pourquoi, quand il existe un groupe de sulfurides, et un autre des plumbides, la galène ou sulfure de plomb serait-elle décrite avec le premier plutôt qu'avec le second? Quand un composé est multiple, lequel des nombreux éléments qui le constituent doit déterminer la classe à laquelle l'espèce appartiendra? Toutes ces difficultés nous semblent graves, et s'il est vrai que, dans une matière aussi complexe, une classification linéaire ne puisse jamais être entièrement satisfaisante, à quelque point de vue qu'on se place, du moins croyons-nous qu'il n'est pas interdit de chercher à se rapprocher un peu plus des conditions naturelles de gisement et de formation des minéraux. C'est ce que nous allons essayer de faire, en nous reportant aux circonstances probables de la formation de l'écorce terrestre (1).

Principe d'une nouvelle méthode. — Selon les probabilités géologiques, la terre a dû former, à l'origine, un amas sphérique de matériaux fluides, superposés par ordre de densités. Lorsque les progrès du refroidissement amenèrent la formation d'une croûte externe, cette croûte ne pouvait manquer de se produire par l'union de la silice, l'élément réfractaire et léger par excellence, et de l'alumine, non moins réfractaire, avec les oxydes des métaux les moins lourds. Cette croûte dut flotter d'abord à la surface du bain métallique, comme font les scories sur les métaux en fusion; quand elle devint consistante, elle forma une écorce solide, séparant le noyau métallique d'une atmosphère

(1) Le principe de cette classification a été exposé pour la première fois dans notre *Traité de Géologie*; depuis longtemps elle est appliquée dans le rangement de la collection minéralogique à l'Institut catholique de Paris.

qui contenait, en vapeurs, l'eau et toutes les substances susceptibles de prendre l'état gazeux à la température de ces premiers âges. De là un premier groupe de minéraux, que nous appellerons minéraux de *scorification*, tous silicatés et formant le fonds principal de la croûte primitive.

La température venant à diminuer, une partie des éléments volatils de l'atmosphère dut se condenser, d'abord dans les océans, puis par voie d'évaporation, de précipitation ou de décomposition chimique, dans certaines régions de l'écorce superficielle. Parfois aussi, les eaux circulant à travers cette écorce s'y chargeaient d'éléments minéraux en dissolution, qu'elles allaient déposer dans les fentes des terrains. Toutes ces réactions ont donné naissance à un second groupe, celui des minéraux de *précipitation chimique*.

Pendant ce temps, à travers les fissures de l'écorce, des émanations de l'intérieur se faisaient jour, amenées à la faveur de minéralisateurs spéciaux et, par une suite de réactions compliquées, déposaient sur les parois des fentes, à titre de minerais, les éléments métalliques empruntés au noyau interne et particulièrement les métaux lourds, qui n'avaient pas trouvé place dans les silicates de la première écorce. Ainsi s'est formé le troisième groupe, celui des minéraux d'*émanation*.

Enfin, par l'activité des organismes, surtout des végétaux, une partie du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène, même de l'azote atmosphériques, a pu être emmagasinée dans l'écorce, produisant le quatrième groupe, celui des minéraux d'*origine organique*.

Groupes principaux. — La première catégorie suffit, presque seule, à former les *Roches* terrestres, en ne considérant sous cette rubrique que les masses minérales de première formation, c'est-à-dire le terrain *primitif* et les roches *éruptives*, et laissant de côté les roches *sédimentaires*, dont chacune provient de la trituration et du remaniement de masses préexistantes. Les minéraux du premier groupe peuvent donc être appelés ÉLÉMENTS DES ROCHES FONDAMENTALES. Ce sont essentiellement les *Pierres* de la classification de Werner.

Les minéraux du second groupe offrent presque tous ce caractère, de former au sein de l'écorce, non des massifs étendus, mais ce qu'on a justement appelé des *gîtes minéraux*. Ainsi les gîtes et amas de phosphorite, de pierre à plâtre, de sel gemme, de carnallite, d'émeri, de marbre, etc. ; ainsi les gangues pierreuses des filons métallifères. De plus, tandis que le premier groupe est entièrement formé par tous les *silicates*, le second est presque uniquement constitué par des *sels*, oxygénés ou haloïdes. Nous en ferons le groupe des ÉLÉMENTS DES GITES MINÉRAUX.

Le troisième groupe est évidemment celui des MINERAIS MÉTALLIQUES.

Quant au quatrième, le nom de COMBUSTIBLES MINÉRAUX lui convient sans conteste. Ses éléments forment la transition entre le monde minéral et le monde organique.

Ainsi en possession de groupes bien définis, très homogènes et d'amplitude

à peu près égale (car si le dernier n'est pas très riche en espèces naturelles, ses masses occupent parfois des étendues considérables), nous pouvons nous appliquer à y établir des subdivisions rationnelles.

Subdivisions du premier groupe. Silicates des roches acides. — *Premier groupe.* — Les roches sont essentiellement de deux natures : il y a les roches *légères* ou *acides*, c'est-à-dire très chargées de silice, auxquelles appartiennent les gneiss et les micaschistes du terrain primitif, les granites, les porphyres, les trachytes, etc. ; il y a ensuite des roches *lourdes* ou *basiques*, moins riches en silice et en alumine, plus chargées de métaux lourds, comme les amphibolites, les trapps, les mélaphyres, les basaltes, etc. Il convient donc d'abord de distinguer, dans les éléments des roches, deux grandes catégories : les *silicates des roches acides* et les *silicates des roches basiques*.

Cela posé, les éléments silicatés des roches acides peuvent se partager en : *essentiels* ou *constitutifs*, et *accessoires*.

Les premiers sont de trois sortes : en tête vient la famille de la *Silice*, qui, sous forme de quartz, constitue généralement la trame solide et comme le squelette des roches acides. Ensuite apparaissent les minéraux clivables de la classe des *Feldspaths*, qui sont, à proprement parler, le corps des roches, auxquelles ils donnent de la cohésion. Enfin l'élément qu'on peut appeler élastique est fourni par les *Micas* en paillettes flexibles.

Or cette série uniquement fondée, en apparence sur des considérations lithologiques, est parfaitement d'accord avec la classification que la chimie pourrait suggérer ; car depuis les feldspaths, riches en silice, alumine et alcalis, jusqu'aux derniers micas, où n'interviennent plus guère, en combinaison avec la silice et l'alumine, que le fer et la magnésie, il y a une transition en quelque sorte continue.

Aux éléments *accessoires* appartiennent les silicates alumineux fluorifères ou boratés, tels que la tourmaline, la topaze, etc. Ces espèces, par les substances chimiques dont elles sont en partie formées, nous apportent de précieuses indications sur la nature des milieux où a dû s'effectuer la cristallisation des roches. Dans la même série viennent encore se ranger les minéraux qui, comme le zircon et les silicates des pays scandinaves, sont spéciaux à certaines catégories exceptionnelles de roches éruptives.

Silicates des roches basiques. Silicates de métamorphisme. — Les éléments silicatés des roches basiques seront en nombre plus restreint, d'autant mieux que quelques-uns auront déjà été décrits avec les minéraux des roches acides, auxquels ils sont souvent associés et dont les analogies chimiques ou cristallographiques empêchent de les séparer. Nous aurons d'abord à distinguer les éléments *essentiels*. De plus, l'observation montre que beaucoup de roches basiques sont *amygdaloïdes*, c'est-à-dire parsemées de cavités que remplissent des minéraux de nature spéciale. Or, le principal remplissage des amygdales ou géodes est constitué par un groupe naturel très homogène de

silicates hydratés, formant la famille des *zéolites*. Cette famille sera donc décrite à la fin des espèces basiques sous le titre : *silicates des amygdales*, par opposition aux minéraux précédents, qui forment à proprement parler la *pâte* des roches en question.

Cela posé, la venue au jour des roches éruptives, surtout de celles de la série acide, a influé sur les roches encaissantes, en y provoquant des phénomènes de cristallisation. Parfois une réaction inverse a modifié les roches éruptives elles-mêmes par l'influence des massifs qu'elles traversaient. De plus, les actions mécaniques auxquelles l'écorce terrestre a plus d'une fois obéi, les émanations hydrothermales qui l'ont parcourue, parfois enfin la simple circulation des eaux météoriques dans sa masse, ont suffi pour modifier, dans beaucoup de cas, la composition originelle des roches, en y faisant naître de nouvelles espèces. Tous ces phénomènes, rangés sous la dénomination générale de *Métamorphisme*, nous autorisent à ajouter, aux éléments des roches fondamentales, une nouvelle catégorie, celle des *Silicates de métamorphisme*, constituant un ordre spécial, dans lequel se rangeront (à l'exception des minerais silicatés) tous les silicates qui n'auront pas trouvé place dans les divisions précédentes. Ce seront d'abord des silicates simplement alumineux, anhydres ou hydratés, puis d'autres contenant du fer, de la magnésie, de la chaux, etc., et susceptibles, comme on le verra par la suite, de fournir des divisions naturelles et homogènes.

Deuxième, troisième et quatrième groupes. — *Deuxième groupe.* — Les éléments des Gîtes ayant dû, en majeure partie, être produits par voie de précipitation ou de séparation chimiques, dans des dissolutions aqueuses et à des températures vraisemblablement très modérées, la meilleure classification de ce groupe paraît être celle qui se fonde sur l'argument chimique. En tête, nous placerons les *oxydes* non métalliques, les divers *sels pierreux*, oxygénés, *aluminates*, *carbonates*, *sulfates*, *phosphates*, etc. ; enfin les sels haloïdes, *chlorures*, *fluorures*, etc., des métaux légers.

Troisième groupe. — De même que, dans l'ordre des besoins naturels de l'humanité, les minéraux du premier groupe fournissent la matière des *constructions* et ceux du second la matière des *arts chimiques*, le troisième groupe renferme tous les matériaux des *arts métallurgiques*. En tête, nous distinguerons, sous le nom de *Minéralisateurs*, les corps à la faveur desquels la plupart des métaux prennent la forme de minerais, soufre, arsenic, antimoine, etc. (1). Puis viendra la description des *minerais*, classés en autant de divisions qu'il y a de *métaux* proprement dits, énumérés dans l'ordre suivant : métaux *natifs* ; minerais *sulfurés*, *arséniés*, *antimoniés*, etc. ; puis minerais *oxydés*, résultant presque toujours de l'altération des précédents ; enfin minerais *haloïdes*. De cette manière, nous ne serons pas obligé, comme dans les classifications pure-

(1) L'oxygène, qui devrait figurer en tête de cette catégorie, échappe à la minéralo ie par suite de son état gazeux.

ment chimiques, de séparer les uns des autres les minerais d'un même métal, si fréquemment réunis dans les gisements naturels.

Quatrième groupe. — Le quatrième groupe est formé de minéraux qui répondent spécialement aux besoins de la grande industrie moderne, à laquelle ils fournissent la force motrice et la lumière. Sa description débutera par les divers état du carbone. Ensuite viendront les hydrocarbures, les combinaisons plus ou moins oxygénées, enfin les sels organiques.

Considérations générales. — Nous ne nous dissimulons pas que cette classification peut encourir, comme toutes les classifications linéaires, le double reproche de séparer quelquefois des espèces qui sembleraient devoir être réunies et d'en associer ensemble qu'il serait préférable de traiter à part. Elle ne peut d'ailleurs être appliquée avec une rigueur absolue et telle espèce figurera, en vertu d'analogies légitimes, parmi les minéraux de la série acide, qui eût pu, avec autant de titres, être incorporée à la série basique. De même, il est des espèces, comme la calcite, qui peuvent faire partie à la fois du premier groupe (en raison des marbres du terrain primitif ou des cristaux contenus dans les trapps amygdaloïdes) et du second (à cause des nombreux filons de cette substance qu'on observe dans l'écorce terrestre et des amas calcaires de certains sédiments). Enfin l'on pourrait légitimement prétendre que beaucoup de substances des gîtes minéraux non métallifères (par exemple les sels rejetés par certains volcans) doivent appartenir à la catégorie des produits d'émanation. Mais de telles défectuosités sont inhérentes à tout essai de classification, et l'essentiel est que chaque groupe présente une suffisante homogénéité, par suite d'une sorte de *compromis* entre les raisons géogéniques, chimiques et physiques, qu'on peut faire entrer en ligne de compte dans l'appréciation de la place qui convient à une espèce.

De cette manière, on ne devra pas s'étonner si, à la suite de la description d'une série de silicates, appartenant bien nettement à l'une de nos subdivisions, nous en faisons figurer quelques autres, étroitement alliés aux premiers au point de vue chimique, mais présentant d'ordinaire un autre mode de gisement. Ces infractions accidentelles à l'homogénéité absolue des groupes nous ont paru préférables à une rigueur dont le résultat eût été d'éparpiller, en quelque sorte, sans profit d'aucun genre, des espèces de même nature.

En résumé, la classification que nous proposons offre à nos yeux l'avantage de respecter, beaucoup mieux qu'une autre, les ***associations naturelles*** (***Paragenesis*** des Allemands) telles qu'elles ressortent d'une étude consciencieuse de la croûte terrestre, sans négliger pour cela les considérations de l'ordre chimique. Nous pensons ainsi qu'elle est propre à rendre la minéralogie plus *intéressante*, en mettant en lumière le rôle dévolu à chaque espèce dans la formation de l'écorce du globe, au lieu de traiter les minéraux comme de simples individualités chimiques. Aussi croyons-nous que, pour tous ceux du moins qui ont conscience de l'intime liaison de la minéralogie avec la géologie, une

telle manière de procéder est avantageuse et de nature à faciliter beaucoup l'exercice de mémoire, nécessaire pour acquérir rapidement la connaissance d'un grand nombre de types minéraux.

Règles suivies dans les descriptions. — Le nom de chaque espèce sera suivi de sa formule, qui permettra de calculer la composition chimique en se reportant à la table des poids atomiques (1). Ensuite viendront les indications relatives au poids spécifique (P. S.), à la dureté (D.), enfin au genre de symétrie, cubique, hexagonale, quadratique, rhomboédrique, rhombique, monoclinique, triclinique (2). Pour caractériser entièrement la forme primitive, nous ferons connaître la valeur du *rapport des axes cristallographiques* (R. A.). Dans les systèmes à axe principal de symétrie, on prend pour unité le paramètre d'un axe binaire, situé dans le plan normal à l'axe principal et on donne, en fonction de cette unité, le paramètre de l'axe vertical ou principal. Dans le système rhombique, appelant a le paramètre de la brachydiagonale, b celui de la macrodiagonale et c celui de l'axe vertical, on suppose $b = 1$ et on exprime a et c en fonction de cette valeur. Dans le système monoclinique, le paramètre b de l'orthodiagonale ou axe binaire étant pris pour unité, on donne d'abord la valeur a du paramètre de la clinodiagonale, puis le paramètre vertical c de l'arête *mm*. On ajoute aussi la valeur de l'angle ph^1, qui est celui de l'axe c avec l'axe a (3). Dans le système triclinique, beaucoup d'auteurs donnent, pour paramètres a, b, c, les longueurs des trois arêtes du parallélépipède fondamental, en ajoutant les angles dièdres qui correspondent respectivement à ces arêtes. Le plus souvent, avec Mallard, afin de faire ressortir la parenté de beaucoup de formes tricliniques avec la symétrie monoclinique, nous choisirons comme paramètre a la diagonale du parallélogramme de base qui va de l'angle o à l'angle a, comme paramètre $b = 1$ l'autre diagonale, celle qui va d'un angle e à l'angle i opposé (et qui serait l'orthodiagonale dans le système monoclinique), c désignant l'arête prismatique *mm*. Alors si la première direction est celle des x, la seconde celle des y, la troisième celle des z, la connaissance des angles plans xy, xz et yz, jointe à celle des paramètres, déterminera entièrement le noyau.

Les propriétés optiques, quand il y aura lieu, seront énumérées sous la rubrique **Opt.** On fera connaître le signe optique, la valeur des indices n_g, n_m, n_p, ou bien, s'il s'agit de substances uniaxes, les valeurs de l'indice ordinaire n_o et de l'indice extraordinaire n_e. Le symbole 2V désignera l'angle *vrai* des axes optiques, tandis que 2E se rapportera à leur écartement dans l'air et 2H à l'angle mesuré dans l'huile. Par A. O., on entendra les Axes optiques. Pour les cristaux rhombiques, on spécifiera celui des axes a, b, ou c (ou celle des

(1) Voir plus haut, p. 404.

(2) Il doit être entendu que, pour beaucoup d'espèces, le système cristallographique indiqué répond à la symétrie apparente, la symétrie réelle pouvant être plus compliquée et n'être pas toujours exactement connue.

(3) Tantôt la valeur donnée est celle de l'angle aigu, tantôt c'est celle de l'angle obtus.

normales aux trois pinacoïdes g^1, h^1, p) avec lequel coïncide la bissectrice aiguë (Biss.) de l'angle des axes. Pour les cristaux monocliniques, si la bissectrice aiguë ne coïncide pas avec l'axe binaire *b*, elle se trouve dans le plan g^1 et il suffit d'indiquer l'angle *aigu* qu'elle y fait avec la trace pg^1 du plan de la base sur g^1. Représentons (fig. 373) la section, par un plan parallèle à g^1, d'un cristal monoclinique, supposé réduit aux faces p, h^1 et g^1. La trace pg^1 étant AB, l'angle de la bissectrice (figurée en pointillé) est positif quand il doit être mesurée dans l'angle obtus ph^1 ou A et négatif quand sa mesure a lieu dans B ou dans l'angle aigu ph^1. On peut aussi donner l'angle aigu de la bissectrice avec l'arête *mm*, c'est-à-dire avec AC ou BD, qui sont les traces de h^1 sur g^1; angle positif si la direction de la bissectrice se place dans l'angle aigu ph^1 et négatif dans le cas contraire.

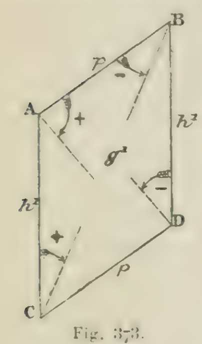


Fig. 373.

Ces conventions de signes s'expliquent, si l'on réfléchit qu'*à partir de ces traces* pg^1 ou h^1g^1, les angles positifs sont ceux qui se comptent dans le sens de la marche des aiguilles d'une montre et les angles négatifs ceux qui se comptent dans le sens contraire.

Les réactions au chalumeau ou les caractères chimiques seront énumérés sous le symbole **Ch.** et, toutes les fois qu'il y aurait simplement lieu de répéter sans changement l'une des réactions mentionnées au chapitre II de cette Section, on se contentera d'en rappeler le numéro.

Pour les principales formes cristallines, on indiquera la valeur des angles dièdres des faces caractéristiques. Ces angles seront les angles vrais. Pour avoir les angles des normales, dont les pôles figurent sur les perspectives stéréographiques, il faudrait en prendre les suppléments (1).

(1) Il y a des auteurs, comme MM. Tschermak et Dana, qui n'indiquent précisément que ces suppléments.

DEUXIÈME SECTION

DESCRIPTION DES MINÉRAUX DU PREMIER GROUPE OU ÉLÉMENTS DES ROCHES FONDAMENTALES

PREMIER ORDRE

ÉLÉMENTS SILICATÉS DES ROCHES ACIDES

PREMIÈRE CLASSE

ÉLÉMENTS ESSENTIELS

FAMILLE DE LA SILICE

Quartz. SiO^2. — P. S. = en moyenne 2,653. — D. = 7. S. rhomboédrique (1), R. A. = 1 : 1,09997; *pp* = 94°15′; angle plan du sommet : 93°57′30″.

Le quartz (2), extrêmement rare à l'état de rhomboèdre isolé, offre le plus souvent la forme du *birhomboèdre* $p\,e^1/_2$, soit seul (fig. 374), soit combiné avec le prisme e^2 (fig. 375). Dans ce dernier cas, les faces prismatiques sont presque toujours striées horizontalement.

Les angles dièdres caractéristiques de cette forme sont les suivants : $pe\,^1/_2$ adjacentes = 133°44′ (sur les arêtes culminantes ; pe^2 adj. = $e^1/_2e^2$ adj. = 141°47′; $p\,e^1/_2$ sur a^1 = 76°26′ ; $pe^1/_2$ sur e^2 = 103°44′. Les faces *p* sont d'ordinaire plus

(1) Nous verrons plus loin que la symétrie ternaire du quartz résulte de la superposition et de l'enroulement de petits individus biaxes. Ajoutons que, pour M. G. Friedel, il faudrait considérer le quartz comme une forme mériédrique de symétrie hexagonale en donnant au birhomboèdre $pe^1/_2$ la notation b^1, e^2 devant *m* et h^1 se substituant à d^1. Mais cette conception est en désaccord formel avec l'ordre de fréquence des faces naturelles de l'espèce.

(2) Le nom de *quartz* est un vieux mot allemand, dont l'usage a prévalu dans toutes les langues.

brillantes et mieux développées que les faces $e^1/_2$; aussi ces dernières forment-elles le plus souvent des troncatures triangulaires (fig. 376), tandis que les autres sont des polygones à sept ou à cinq côtés (variété *bisalterne* d'Haüy). Assez souvent on remarque, sur les faces p, des impressions en creux ou des

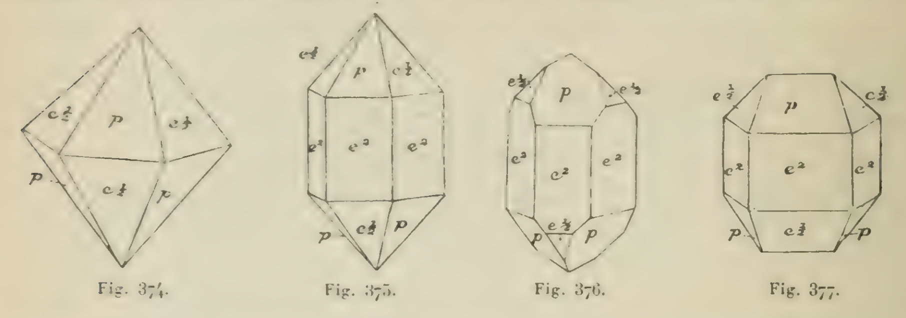


Fig. 374. Fig. 375. Fig. 376. Fig. 377.

saillies, ayant la forme de petits triangles isocèles, qui tournent leur base, parallèle à l'arête pe^2, du côté du pointement pyramidal (1).

La combinaison $pe^1/_2\, e^2$ est fort inégale dans son développement; tantôt elle est très régulière, comme dans la figure 375; tantôt deux faces prismatiques opposées prennent un très grand développement (fig. 377), formant la variété *comprimée* d'Haüy. Parfois cet accroissement de deux faces e^2 se fait obliquement (fig. 378) de manière à donner des cristaux qui semblent étirés dans une direction oblique sur l'axe (var. *sphalloïde*). Beaucoup de cristaux du Dauphiné offrent un développement

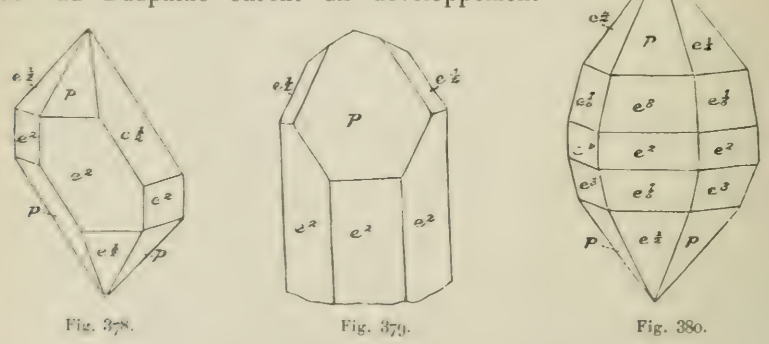


Fig. 378. Fig. 379. Fig. 380.

excessif de l'une des faces p (fig. 379) et se terminent alors à peu près en biseau (var. *basoïde*).

Il est des cas où la coexistence de plusieurs formes birhomboédriques, par exemple $pe^1/_2$ avec e^3 et $e^7/_5$, donne aux cristaux une apparence *fusiforme* (fig. 380) ou encore les fait ressembler à des *obélisques*. Dans quelques cristaux fusiformes, il se produit au voisinage du sommet une atrophie progressive des

(1) Selon les observations de M. Molengraaff (*Zeits. f. Krystallog.*, XIV, 1888; XVII, 1889) ces impressions sont très semblables aux figures d'attaque du quartz par les carbonates alcalins, tandis que les figures de corrosion par l'acide fluorhydrique sont très différentes.

faces $e^1/_2$ ainsi que des faces correspondantes de e^2; de sorte que le cristal paraît terminé par un prisme triangulaire équilatéral, que coiffent les trois faces p. Enfin il y a des cristaux prismatiques de quartz qui sont comme *tordus*.

Les rhomboèdres les plus fréquents, avec p et $e^1/_2$, sont : a^4 avec son birhomboédrique b^1, $e^7/_2$, e^3, $e^{11}/_4$, $e^5/_3$, $e^{13}/_8$, $e^7/_4$, ce dernier souvent observé dans les cristaux du Dauphiné. Les combinaisons $p\ e^2\ e^3$ et $p\ e^2\ e^7/_2$, sans $e^1/_2$, ne sont pas rares.

Le prisme d^1 se rencontre dans les cristaux de quartz de Carrare, sous forme de minces facettes, tangentes à trois des six arêtes du prisme e^2. La face a^1 est très rare.

Le polyèdre particulaire du quartz est *holoaxe hémisymétrique*. Il en résulte un genre d'hémiédrie qui n'est apte à se manifester que sur d^1 et sur les formes obliques.

Cette hémiédrie se reconnaît habituellement dans le quartz à l'existence des faces *rhombes* ρ et *plagièdres* σ (fig. 381, 382). Les premières appartiennent à l'hémi-isocéloèdre ou ditrièdre $(41\bar{2}) = \{ d^1/_4\ d^1\ b^1/_2 \}$, les autres à des hémiscalénoèdres, qui peuvent être $(4\bar{1}\bar{2}) = \{ b^1/_4\ d^1\ d^1/_2 \}$, ou encore $\{ b^1/_{15} d^1/_5 d^1/_8 \}$ et $\{ b^1/_8 d^1 d^1/_4 \}$. Dans le premier de ces hémiscalénoèdres, qui est le plus fréquent, chaque face fait, avec la face p adjacente, un angle de $148°46'$ et, avec la face e^2 correspondante, un angle de $167°59'$. Les cristaux qui portent les faces ρ et σ sont dits *rhombifères* et *plagiorhombifères*.

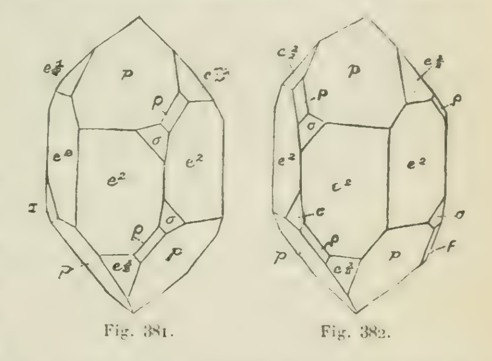


Fig. 381. Fig. 382.

Quand les faces rhombes sont striées, elles ne le sont que parallèlement à l'une des couples d'arêtes du rhombe. Nous avons indiqué plus haut (1) comment la position des faces rhombes et plagièdres permettait de prévoir le sens dans lequel s'exerce le pouvoir rotatoire du quartz. Ajoutons que, dans les cristaux *dextrogyres*, les rhombes sont striés suivant des lignes qui vont *en descendant de droite à gauche*. L'inverse a lieu dans les cristaux *lévogyres*

Lorsque les faces plagièdres coexistent avec les faces rhombes, il n'est pas nécessaire, pour connaître le sens de la rotation, de déterminer d'abord celles des faces du pointement qui doivent porter la notation p. Il suffit de se souvenir que, dans les cristaux lévogyres, la face rhombe ρ est en haut à gauche de la face plagièdre σ (fig. 382), tandis que, dans les cristaux dextrogyres (fig. 381), elle est en haut à droite.

L'isocéloèdre $\{ b^1 d^1/_2 d^1/_5 \}$, qui forme zone avec deux faces adjacentes de

(1) V. plus haut, p. 276.

$p\,e^1/_2$, apparaît, dans certains cristaux d'Oberstein et de Québec (quartz *émarginé*), à l'état de facettes tangentes sur trois des arêtes culminantes du pointement birhomboédrique.

Souvent il s'est produit, dans la formation des cristaux de quartz, des interruptions pendant lesquelles un mince dépôt d'argile s'est appliqué sur les faces p et $e^1/_2$. On peut alors, dans certains cas, déboîter les zones d'accroissement de ces cristaux dits *encapuchonnés*.

Les macles les plus fréquentes résultent de l'accolement de plusieurs individus à faces parallèles et souvent compris sous une enveloppe commune. Les faces p de l'un et $e^1/_2$ de l'autre se disposent dans un même plan (fig. 383).

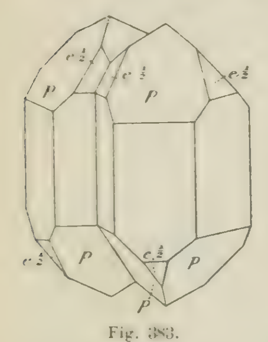


Fig. 383.

Tantôt les macles à axes parallèles sont symétriques par rapport à a^1, ce qui peut donner des cristaux où la même face e^2 du prisme aboutit en haut et en bas à deux faces de même notation, p ou $e^1/_2$; tantôt la macle, soit par accolement, soit par pénétration, est symétrique par rapport à une face e^2. Enfin, dans la macle du Brésil, c'est relativement à d^1 que la symétrie est réalisée, pouvant simuler un cristal simple, où se trouvent combinées les faces caractéristiques des cristaux dextrogyres et des cristaux lévogyres.

Quelquefois, comme à La Gardette, deux cristaux s'accouplent suivant une face de l'isocéloèdre $(b^1 d^1/_2 d^1/_5) = (11\bar{2}2) = (52\bar{1})$. L'angle des axes ternaires est alors de 84°34′, ce qui donne presque une macle à angle droit, et les deux composants ont chacun une face e^2 dans le même plan.

On connaît aussi une macle suivant p, les axes verticaux des deux individus faisant ensemble un angle de 103°34′, auquel cas quatre cristaux peuvent se grouper de telle façon que trois d'entre eux aient chacun une face p parallèle à l'une des faces p de l'individu central (1).

Des portions de cristaux dextrogyres et lévogyres peuvent se trouver associées sous une enveloppe commune. Dans les améthystes du Brésil, ces groupements sont assez réguliers pour supprimer entièrement le pouvoir rotatoire. Cette particularité se dévoile par une cassure inégale et chagrinée et, mieux encore, par les différences entre les plages de corrosion que présente le cristal après une attaque à l'acide fluorhydrique.

Le quartz a longtemps passé pour être dépourvu de clivages. Mais on connaît aujourd'hui des échantillons qui présentent, sous formes de faces intérieures dites *glaces*, des indices plus ou moins nets de clivage parallèlement à p. On a signalé aussi des traces de clivage e^2 (Madagascar). Cependant il

(1) On a également indiqué une macle parallèle à a^4, et M. Friedel a préparé artificiellement des cristaux qui se maclaient en croix, ayant en commun une face e^2, avec plan de macle compris dans la zone $a^1 d^1$, à 45° de l'axe.

pourrait se faire que ces clivages fussent des plans de glissement, ou des fissures de contraction, ayant pris naissance par suite d'efforts auxquels les cristaux auraient été soumis, par exemple sous l'influence de brusques changements de température (1). Taillé en plaques parallèles aux faces du prisme d^1, le quartz manifeste la pyro-électricité (2). Il s'électrise positivement par le frottement.

Tantôt incolore, tantôt diversement coloré, le quartz offre un éclat vitreux sur les faces naturelles, un peu gras dans la cassure, qui est conchoïdale et raboteuse; sa poussière est blanche.

Opt. Signe positif. Pour la raie D du spectre, $n = 1,54423$; $n_e = 1,55338$. Pour offrir la croix noire et les anneaux des cristaux uniaxes, une lame de quartz doit avoir moins de 2 millimètres d'épaisseur; autrement la polarisation rotatoire apparaît. C'est avec une épaisseur de $3^{mm},75$ qu'une plaque normale à l'axe offre la *teinte sensible* de violet bleu qui, lorsqu'on tourne l'analyseur de gauche à droite, passe au rouge si le cristal est dextrogyre (3).

Sous le microscope, en plaques minces, le quartz est caractérisé par son aspect vitreux, par l'absence de fissures de clivages, ainsi que par les abondantes inclusions liquides qu'il renferme, en traînées irrégulières ou en essaims. C'est au grand nombre de ces inclusions que doit être attribuée l'apparence trouble et laiteuse du quartz des granites. L'indice du quartz étant à peu près égal à celui du baume de Canada, la surface des préparations se montre tout à fait plane et dépourvue de relief.

Pour une épaisseur inférieure à $0^{mm},03$, la teinte chromatique du quartz, en plaque mince, ne doit pas dépasser le gris du premier ordre. Elle n'atteint le rouge que pour $0^{mm},06$.

Quelquefois les grains de quartz des roches granitoïdes présentent, entre les nicols croisés, ce que M. Rosenbusch appelle une *extinction onduleuse*, l'orientation optique n'étant pas absolument constante dans toute l'étendue du grain. Le même auteur attribue cet état particulier à une déformation mécanique, ultérieurement subie par la roche (4).

Ch. Insoluble dans tous les acides, sauf l'acide fluorhydrique, et soluble, près fusion, dans la potasse caustique, le quartz ne peut être fondu qu'à la flamme du chalumeau oxhydrique. Dans ces circonstances, il perd son pouvoir rotatoire; sa dureté diminue et son poids spécifique s'abaisse à 2,2. Traité par la soude, il fond avec bouillonnement en un verre clair. M. Le Chatelier a constaté qu'à 580 degrés, le quartz subissait un changement d'état marqué, mais reversible, affectant à la fois le coefficient de dilatation, le pouvoir rotatoire et la biréfringence. La fusion ayant lieu vers 1775°, il y a commencement de ramollissement à 1200° et même avant.

(1) Voir Judd, *Mineralogical Magazine*, 1888. Ce savant a reconnu, dans certains cristaux de quartz, l'existence de fines lamelles parallèles à p et à $e^1/_2$, et dont les unes sont dextrogyres, les autres lévogyres; de telle sorte que leur superposition produit les spirales d'Airy. — (2) Voir plus haut, p. 316. — (3) Voir plus haut, p. 276. — (4) *Mikr. Physiographie*, p. 341.

Les variétés de quartz sont très nombreuses. En première ligne se placent celles qu'on peut grouper sous la dénomination commune de *cristal de roche* et qui garnissent de leurs cristaux les druses de certains filons. Les gîtes les plus remarquables sont ceux du Saint-Gothard, du Tyrol, de l'Oisans, de Madagascar, etc., où un seul individu atteint quelquefois 1 ou 2 mètres de tour, avec un poids de 300 à 400 kilogrammes.

Le caractère commun des cristaux de roche est le développement du prisme pyramidé $pe^2e^{1/2}$. Les faces rhombes et plagièdres y sont fréquentes.

Au cristal de roche se rapportent le *quartz hyalin*, c'est-à-dire la variété incolore et limpide, utilisée dans les arts et l'optique; le *quartz enfumé*, coloré en noir (*morion*) ou en brun et dont la coloration serait due, suivant les uns, à un composé d'hydrogène, de carbone et d'azote, qui peut disparaître entièrement par calcination à 200 degrés dans une atmosphère dépourvue d'oxygène; suivant d'autres, le principe colorant serait un sulfocyanate de fer; la *fausse topaze* ou *citrine*, d'une nuance jaune, qui par une calcination ménagée fournit des pierres d'une belle teinte; le *quartz chloriteux*, fréquent dans l'Oisans et coloré en vert par des lamelles de chlorite : le *quartz ferrugineux*, en prismes bipyramidés, tantôt d'un jaune de miel, tantôt, comme dans l'*hyacinthe de Compostelle* et le quartz *hématoïde* (*Eisenkiesel*), coloré en rouge sang ou en rose par du peroxyde de fer. Le *caillou du Rhin* est du cristal de roche roulé.

L'*améthyste*, où le prisme est atrophié, la pyramide birhomboédrique se montrant à peu près seule, est du quartz violet, formé d'une superposition plus ou moins régulière d'assises dextrogyres et lévogyres. Les couches violettes sont le plus souvent parallèles aux faces p. La coloration a été attribuée tantôt au manganèse, tantôt à un composé de chaux, soude, magnésie et fer. Cependant l'améthyste la plus foncée contient moins de 0,25 % d'oxyde de manganèse et perd sa couleur à 250°, ce qui donne à penser que le principe colorant doit être, au moins en partie, un composé du carbone.

On donne le nom d'*œil de chat* à une variété de quartz pénétrée de fibres d'amiante, qui lui impriment un reflet particulier; le *girasol* est un quartz laiteux opalescent; l'*aventurine*, brune ou rougeâtre, contient de nombreux points brillants, quelquefois de mica, qui réfléchissent vivement la lumière. Certains cristaux de quartz sont parcourus par de fines aiguilles de rutile (*cheveux de Vénus*) et quelquefois aussi par de très minces baguettes de tourmaline noire.

Le *quartz commun*, généralement laiteux, qui forme le remplissage de nombreux filons, est entièrement cristallisé, mais d'une manière confuse. Il établit la transition entre le quartz proprement dit et les substances cryptocristallines dont il va être question.

Au quartz se rattachent une série de variétés fibreuses ou compactes, constituées par de la silice anhydre, toujours plus ou moins imbibée d'*opale* ou silice

hydratée. Ce sont la *calcédoine*, le *silex* et les *jaspes*. Des études récentes (1) ont montré qu'il y avait lieu d'y distinguer trois types, qui tous trois sont biaxes et optiquement positifs, dont la biréfringence et la réfringence sont sensiblement les mêmes que pour le quartz, mais qui se différencient : 1° par la direction et le signe optique de l'allongement de leurs fibres; 2° par les groupements réguliers que peuvent former ces fibres en donnant naissance à des assemblages ternaires ou pseudosénaires.

Ces types sont la *Quartzine*, la *Calcédonite* et la *Lutécite*. Dans les deux premiers, l'allongement des fibres se fait parallèlement à l'un des axes de l'ellipsoïde optique. Dans le troisième, l'allongement est oblique par rapport à ces axes.

La **Quartzine** a ses fibres allongées suivant n_g. Selon M. Wallerant, sa forme élémentaire est triclinique, et la substance forme de petits tétraèdres de 60°, dont la superposition donnerait un enroulement discontinu, par sauts de 120°, permettant la production du quartz à pouvoir rotatoire.

Dans la **Calcédonite** de M. Lacroix, au contraire, l'allongement des fibres a lieu suivant n_p, et la biréfringence, dans la zone d'allongement, varie beaucoup, tandis qu'elle est constante pour la quartzine. Cette variation résulte de ce que le minéral est formé d'éléments où la bissectrice aiguë positive n_g s'enroule en hélice autour de l'axe de la fibre, auquel elle reste perpendiculaire.

M. Lacroix distingue, sous le nom de *Pseudocalcédonite*, une autre variété de quartz fibreux, mais où le signe optique est négatif, les fibres étant parallèles à la bissectrice aiguë. D'ailleurs la biréfringence n'est que 0,0045, soit la moitié de celle de la quartzine.

Dans la **Lutécite** ou **Lutécine** (2), les fibres se groupent autour d'un axe pseudosénaire, avec lequel leur direction d'extinction fait un angle de 37°. Les fibres s'arrangent de manière à constituer des pyramides pseudohexagonales surbaissées, atteignant rarement un demi-millimètre et s'empilant en grand nombre suivant l'axe vertical.

L'association des diverses variétés fibreuses du quartz qui viennent d'être énumérées engendre une série de minéraux dont les plus homogènes, exclusivement constitués de produits fibreux avec un peu d'opale, et possédant d'ordinaire une structure externe concrétionnée, sont groupés sous le nom de **Calcédoine** (3). Le poids spécifique de la Calcédoine varie de 2,59 à 2,64; c'est-à-dire qu'il est inférieur à celui du quartz, ce qu'explique la présence de l'opale, mise en évidence d'abord par la perte de 2 à 3 % que la calcination fait subir au minéral, ensuite par le fait qu'il est en partie attaquable par la potasse caustique.

(1) Michel-Lévy et Munier-Chalmas, *Bull. soc. miner.*, XV, p. 159; Wallerant, *ibid.*, XX, p. 67; Lacroix, *Comptes rendus*, CXXX, p. 430; *Minéralogie de la France*, t. III. — (2) Cette substance a été signalée pour la première fois à Passy, sous la forme de masses grenues de quartz, en lentilles substituées à des cristaux de gypse. Le nom de lutécine a été donné par MM. Michel-Lévy et Munier-Chalmas. — (3) Nom tiré de la ville de Chalcédoine en Asie Mineure.

La calcédoine, en masses sphéroïdales, concrétionnées ou stalactitiformes, présente une cassure unie et se montre translucide en masse. Qualifiée de *cornaline* quand elle est rouge, de *sardoine* quand elle est brune, avec couleur rouge sang par transmission, de *plasma* quand elle est vert foncé, d'*héliotrope* ou *jaspe sanguin*, quand, avec une pâte verte, elle offre des taches rouge sang, elle s'appelle *chrysoprase* lorsqu'elle possède une coloration vert pomme, due au nickel. On observe à Lussat, près Pont-du-Château, dans la Limagne d'Auvergne, une calcédoine dite *guttulaire* ou en *gouttes de suif*, qui forme, à la surface d'un tuf bitumineux, des enduits souvent superposés à des groupes rayonnés de cristaux de quartz hyalin (1).

La calcédoine nettement divisée en zones concentriques de colorations diverses et alternant avec des bandes d'améthyste, de jaspe et de quartz, prend le nom d'*Agate* (de la rivière Achates en Sicile). L'intensité de ces colorations peut être accrue par des procédés chimiques, usités à Oberstein (Palatinat). Les zones qui prennent le mieux la couleur paraissent être celles où la calcédoine est le plus hydratée. Souvent on trouve dans l'agate des alternances, maintes fois répétées, des diverses sortes de produits fibreux, une zone de calcédonite précédant une zone de quartzine, à laquelle succède une autre zone de calcédonite, et ainsi de suite. Quelquefois l'agate est parcourue par de fines veinules d'oxyde de fer et de manganèse, disposées en filaments d'apparence végétale (agate *arborisée* ou *herborisée*, agate *mousseuse*). Quand les zones successives sont régulières, assez épaisses et bien nuancées, l'agate devient de l'*onyx* et se prête aux usages de la joaillerie, notamment à la fabrication des camées.

Les calcédoines (généralement en calcédonite) des terrains volcaniques contiennent parfois dans leur intérieur des cavités remplies d'eau (*enhydres*).

La calcédoine s'altère à l'air par suite de la déshydratation de l'opale.

Quand la calcédoine ou la quartzine devient très compacte, avec une orientation des éléments de plus en plus confuse, elle passe au **Silex**. P.S. = 2,59 à 2,61. Ce minéral est gris, brun, jaune ou noir. On distingue le silex *pyromaque* ou pierre à fusil, à cassure esquilleuse ; le silex *corné* (*hornstein*), à cassure plutôt plate et parfois conchoïdale ; le silex noir ou *phthanite*, qui abonde dans le calcaire carbonifère ; la *pierre meulière*, quelquefois fortement cariée et ferrugineuse ; le silex *xyloïde* ou bois silicifié, etc.

Le silex pyromaque paraît avoir été originairement formé d'opale (spicules d'éponges, carapaces de radiolaires ou de diatomées). Dans la plupart des cas, l'opale s'est déshydratée et transformée en produits cristallins (cristaux de quartz ou mamelons de calcédoine des géodes des silex). La déshydratation du silex s'opère aussi à l'air libre en donnant lieu à la formation d'une patine blanche, parfois pulvérulente (*Passyite*) (2).

(1) Mallard a donné le nom de *Lussatite* à ces enduits fibreux, dont le poids spécifique est très faible (2,04), et dont les fibres ont un allongement positif. — (2) Lacroix, *Minéralogie de la France*, III, pp. 133, 150.

Les silex impurs et compacts, véritables argiles durcies, sursaturées de silice anhydre, portent le nom de *jaspes*. A cette catégorie appartient le *jaspe noir* ou *quartz lydien*, également appelé *lydite*, et aussi qualifié de *pierre de touche* à cause de son emploi dans la bijouterie, les objets d'or laissant sur sa surface mate une trace dont on peut étudier la manière d'être avec les acides

Ajoutons que le quartz est souvent *pseudomorphique* d'autres minéraux, tels que le gypse en cristaux aciculaires et en fibres, et que parfois il s'est moulé sur des cristaux de barytine ou de fluorine, dont il a gardé l'empreinte.

La **Tridymite** est une espèce composée, comme le quartz, de silice anhydre, mais cristallisant en tablettes incolores, à éclat vitreux, un peu nacré, qui se maclent par deux ou par trois (d'où le nom, dérivé de τρίδυμος, à trois jumeaux).

La dureté de la tridymite est de 7. Sa densité de 2,285, c'est-à-dire qu'elle est voisine de celle du quartz fondu; et il est à remarquer qu'on ne trouve guère cette espèce que dans des roches volcaniques, surtout des trachytes, souvent même comme produit de la calcination de roches siliceuses au contact d'épanchements ignés. De même, la silice amorphe et le quartz pulvérulent se transforment par calcination en un agrégat de lamelles de tridymite.

Un examen optique délicat montre que la tridymite est en réalité triclinique, mais avec forme-limite rhombique (R.A. = 0,577 : 1 : 0,954) très voisine de la forme hexagonale et aussi pseudocubique. Les lamelles qui ont l'apparence d'hexagones résultent de macles avec faces b^6 pour faces d'accolement. Sous l'influence d'une chaleur modérée, d'environ 130 degrés, elles deviennent uniaxes (1).

Opt. — Signe positif. $2E = 66^\circ, 2V = 43^\circ$ A.O. dans h^1. Biss. n_g sensiblement perpendiculaire à p; $n_p = 1,41$. Biréfringence : 0,0016.

Une troisième manière d'être de la silice cristallisée a été découverte par M. Maskelyne dans un fer météorique et nommée **Asmanite** (d'un mot indien qui signifie *foudre*). — P.S. = 2,245. — D. = 5,5. L'espèce, qui offre des indices visibles de calcination, est rhombique avec $mm = 120^\circ 20'$; R.A. = 0,573 : 1 : 1,899. Ses formes diffèrent beaucoup de celles de la tridymite. Cependant, si l'on diminue de moitié le paramètre de l'axe vertical, on identifie presque complètement les données cristallographiques des deux espèces.

La *Cristobalite* (de San Cristobal au Mexique) est une silice en octaèdres presque réguliers (P.S. = 2,34 : $n_m = 1,432$), de symétrie quadratique à limite cubique au-dessous de 175°, mais devenant cubique au-dessus. Opt. négative.

D'après cela, Mallard estimait que la silice comportait deux états allotropiques; l'un, celui de quartz, avec densité voisine de 2,6, qui ne serait stable qu'au-dessous de 1 000 degrés; l'autre, celui de Tridymite ou de Cristobalite,

(1) Mallard, *Bull. soc. minéral.*, XIII, p. 171. — Au contraire, le quartz, chauffé au-dessus de 1200 degrés, devient opaque, amorphe et se transforme ensuite en tridymite (Le Chatelier).

à densité voisine de 2,2, formé exclusivement à des températures élevées, mais stable à toute température et résistant mieux aux actions chimiques.

Opale. $SiO^2 + aq.$ — P.S. = 1,9 à 2,3. — D = 5,5 à 6,5.

Sous la dénomination d'*Opale* (déjà employée par Pline), se groupent les diverses variétés de *silice hydratée* ou *gélatineuse*. La proportion d'eau y varie de 3 à 13 %, et l'on y trouve quelquefois de petites quantités d'oxyde ferrique, d'alumine, de chaux, de magnésie et d'alcalis.

L'opale est *colloïde*, c'est-à-dire réfractaire à la cristallisation ; en outre il paraît exister toute une suite de passages entre la silice gélatineuse saturée d'eau et une silice anhydre, également colloïde, qui formerait la base de la matière pétrosiliceuse de certains porphyres (1).

L'opale est cassante, à cassure conchoïdale ou inégale, à éclat gras ou vitreux. Toutes ses variétés donnent de l'eau dans le tube, décrépitent au chalumeau et sont plus ou moins facilement solubles dans la potasse caustique. L'indice de réfraction varie de 1,406 à 1,455.

L'*opale noble*, utilisée dans la joaillerie, est remarquable par la beauté de ses reflets irisés. Ces reflets sont attribués, par les uns à la présence d'une petite quantité de matière hydro-carbonée, par les autres à l'existence de cavités internes, disposées en réseaux réguliers, par d'autres enfin à des fentes de retrait, à peu près parallèles aux surfaces, souvent mamelonnées, de l'opale et remplies après coup par des exsudations, de densités légèrement différentes. A cause de son retrait et des compressions inégales qui en ont été la conséquence, l'opale noble manifeste fréquemment les propriétés d'une substance biréfringente biaxe, de signe négatif (2).

Il en est de même de l'*hyalite*, qui est une opale transparente et vitreuse, à 3 % d'eau, sans jeux de lumière, à éclat gras prononcé, affectant une structure globulaire par couches concentriques.

L'*opale de feu*, du Mexique, à 6 ou 8 % d'eau, offre, avec l'éclat gras, une grande vivacité de couleurs dans les tons jaunes ou rouges. Il existe aussi une variété d'opale sous le nom de *girasol*.

L'*opale commune* ou *semi-opale* comprend toutes les variétés de silice hydratée qui sont colorées, à éclat gras ou résineux et dépourvues de jeux de lumière : c'est-à-dire le silex *résinite*, blanc laiteux, jaune, brun ou noir, parfois rouge-cochenille, comme à Quincy, et généralement redevable de sa couleur à des hydrocarbures ; le *cacholong*, en rognons ou enduits jaunâtres ou d'un blanc

(1) Fouqué et Michel-Lévy, *Minéralogie micrographique*, p. 186. — (2) Ce signe est celui que prend nécessairement, par suite de la déformation de son ellipsoïde optique, une substance uniréfringente comprimée.

de porcelaine, avec 3,5 % d'eau seulement (1); l'*hydrophane*, qui devient transparente en s'imbibant d'eau et prend facilement, avec la fuchsine, une couleur dont on ne peut la débarrasser que par une longue ébullition dans l'alcool; le *ménilite*, en rognons concrétionnés, toujours magnésiens (7 à 10 %); le *silex nectique*, si léger qu'il flotte sur l'eau, et dû à une transformation de lentilles de gypse en opale à 4 ou 5 % d'eau, les vides de la substance correspondant au calcaire qui, dans l'origine, enveloppait les cristaux de gypse (2); la *geysérite* ou silice déposée par les geysers, en masses fibreuses, rognonneuses ou formant chou-fleur, avec 3 à 13 % d'eau; le *jaspe-opale*, généralement très ferrugineux; enfin certaines variétés hydratées de bois silicifié.

C'est aussi à l'opale que doit être rapporté le *tripoli* ou *farine fossile siliceuse*, formé par l'accumulation de frustules de diatomées ou algues élémentaires.

L'opale se montre comme élément secondaire dans certaines roches acides et remplit les vacuoles de quelques roches basiques. Généralement isotrope, elle forme parfois des sphérolithes qui, entre les nicols croisés, donnent une croix noire.

FAMILLE DES FELDSPATHS

La famille des feldspaths forme un groupe naturel d'une très grande importance, d'abord en raison du rôle capital qu'elle joue dans la composition des roches d'origine interne, ensuite parce qu'on y trouve de remarquables applications des lois de l'isomorphisme et de celles des formes-limites. La liaison mutuelle des diverses espèces feldspathiques est si intime que nous les décrirons toutes ensemble, quoique plusieurs d'entre elles ne se rencontrent guère que dans les roches basiques. Seulement, nous diviserons la famille feldspathique en deux genres : celui des *Feldspathides* ou feldspaths proprement dits, et celui des *Feldspathoïdes* ou minéraux remplissant, par leur composition chimique et leurs associations habituelles, un rôle analogue à celui des feldspaths.

GENRE FELDSPATHIDE

Les *feldspathides* peuvent être considérés comme formés par l'union de la silice et de l'alumine avec des bases presque exclusivement empruntées aux alcalis et aux terres alcalines. Ces bases sont surtout la potasse, la soude, la chaux et, plus rarement, la magnésie.

(1) Mallard s'est assuré que certains minéraux blancs, finement fibreux, habituellement désignés dans les collections sous le nom de cacholong, étaient cristallisés, de signe optique négatif, avec poids spécifique égal à 2,2, et que la calcination ne changeait rien à leurs propriétés optiques. Ce serait donc à tort qu'on aurait, jusqu'ici, attribué le cacholong fibreux à l'opale. — (2) Lacroix, *Nouvelles archives du Muséum*, LX, p. 201.

Tous les feldspathides rentrent dans ce que les chimistes appellent les *poly-silicates*, considérés comme constitués par divers acides du silicium, $Si^3O^8H^4$, $Si^2O^5H^2$ et $Si^3O^{12}H^{14}$, où H^4 peut être remplacé par le groupe (AlK) ou le groupe (AlNa).

Sous cette composition générale viennent se ranger plusieurs espèces minéralogiquement bien définies, dont quelques-unes sont de symétrie monoclinique, ou du moins extrêmement voisine, tandis que toutes les autres sont tricliniques, mais avec des formes très rapprochées de celles des premières. De plus, toutes ces espèces sont caractérisées par un clivage très facile, parallèle à la base p, et par un autre, un peu moins facile, suivant g^1.

Dans le principal d'entre les feldspaths de la première catégorie, celui qui a la potasse pour alcali dominant, l'angle de p avec g^1 est droit, d'où le nom d'*orthoclase* ou *orthose*, qui lui a été donné. Dans les feldspaths tricliniques, il s'en faut de plusieurs degrés que l'angle des deux clivages soit droit. Ces clivages sont donc *obliques* l'un sur l'autre, ce qu'on exprime en rangeant ces feldspaths tricliniques sous la désignation générique de *plagioclases* (πλαγίος, oblique) ou *clinoclases* (κλίνω, j'incline).

FELDSPATHS MONOCLINIQUES ET PSEUDOMONOCLINIQUES

1° **Orthose**. $K^2Al^2Si^6O^{16}$ (c'est-à-dire 2 [Si^3O^8AlK]). — P.S. = 2,53 à 2,59. — D. = 6.

L'orthose, qui est par excellence le fedspath potassique, renferme : 64 à 68. SiO^2; 17 à 20. Al^2O^3; 7 à 14. K^2O; 1 à 6. Na^2O; 0,3 à 2. CaO; 0 à 1. MgO et FeO. La moyenne de la teneur en silice est de 65 %; celle de la teneur en potasse, 12 à 13 %.

En répartissant comme il convient les 16 atomes d'oxygène entre les bases de formule R^2O ou RO, celles de formule R^2O^3 et enfin la silice, on trouve que le rapport de ces trois quantités, dit *rapport d'oxygène*, est 1 : 3 : 12.

S. monoclinique (en réalité, d'après Mallard, l'orthose est triclinique avec pseudosymétrie monoclinique, d'ailleurs peu éloignée d'une symétrie cubique). R. A. = 0,659 : 1 : 0,556. $m\,m = 118°48'$; $ph^1 = 116°7'$.

Les combinaisons de formes les plus habituelles sont les suivantes : mpa^1; mpg^1a^1 (fig. 384), toutes deux fréquentes dans l'adulaire, avec stries horizontales sur a^1; $mg^1pa^1/_2$, très répandue dans les orthoses des roches granitiques et porphyriques; $mg^1pa^1a^1/_2b^1/_2e^1/_2$ (fig. 385) : la même avec $o^1/_2, g^2$, etc

Principaux angles : $pm = 112°16'$; $mg^1 = 120°36'$; $mg^2 = 150°0'$; $g^1g^2 = 150°36'$; $pa^1 = 129°40'$; $pa^1/_2 = 99°37'$; $po^1/_2 = 133°59'$; $pe^1/_2 = 135°3'$; $g^1e^1/_2$ adjacentes $= 134°57'$.

Dans l'adulaire, il arrive souvent que p et a^1 aient le même développement.

De plus, les faces g^2 de cette variété se montrent ternes et parfois recouvertes d'un léger enduit de ripidolite. La zone mg^2g^1 est striée parallèlement à son axe.

Les cristaux d'orthose sont généralement allongés suivant le plan de symétrie g^1 et, le plus souvent, l'allongement a lieu parallèlement à l'arête pg^1. Aussi,

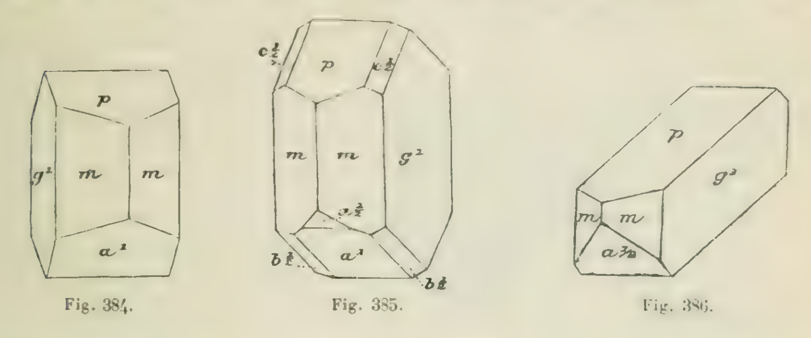


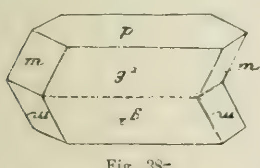
Fig. 384. Fig. 385. Fig. 386.

grâce à la prédominance des faces p et g^1, qui sont perpendiculaires l'une à l'autre, beaucoup de cristaux ont-ils l'apparence de prismes quadratiques à sommets trièdres (fig. 386).

Les macles de l'orthose sont fréquentes. On distingue :

1° Hémitropie avec g^1 pour face de jonction et la normale à g^1 pour axe. Cette normale étant un axe de symétrie, rien n'est changé à la disposition des réseaux, qui se poursuivent d'un cristal dans l'autre, et la macle ne se révèle que par une ligne de suture.

2° Plan d'assemblage parallèle à p et axe normal. Il en résulte (fig. 387), d'un côté des angles rentrants, de l'autre des angles saillants. L'ensemble des deux cristaux possède, en sus



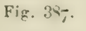


Fig. 387.

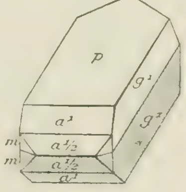


Fig. 388.

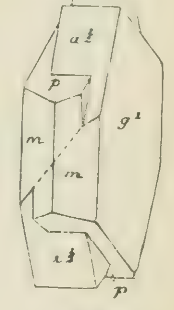


Fig. 389.

de g^1, un plan de symétrie dans la face p de jonction. C'est la macle dite *de Manebach* ou aussi de *Four-la-Brouque*. La figure 388 représente cette macle dans le cas où les cristaux portent les faces a^1 et $a^1/_2$, les faces m étant subordonnées.

3° Plan d'assemblage parallèle à g^1 et rotation apparente de 180° autour de l'arête mm. C'est la *macle de Carlsbad* (fig. 389), dont nous avons déjà donné l'explication (1). Cette macle s'aperçoit très bien dans les cristaux engagés au

(1) Voir plus haut, pp. 322, 336.

milieu de la pâte des roches; car la surface de la coupe rencontrant les plans successifs de clivage d'une manière différente dans les deux cristaux accouplés, on voit ces plans miroiter en escalier dans l'une des moitiés du groupe, tandis que l'autre reste terne.

Fréquente dans les granites et certains porphyres quartzifères, la macle de Carlsbad atteint d'assez grandes dimensions dans les trachytes, mais surtout dans quelques granites porphyroïdes, comme celui de Rostrenen (Bretagne), où les cristaux, d'ailleurs très impurs, ont parfois plus de dix centimètres de longueur. Souvent cette macle a lieu entre deux cristaux qui portent les faces p et a^1. Or l'angle aigu ph^1 étant de 63°53′, tandis que a^1h^1 est de 65°47′, il arrive souvent que les deux faces voisines a^1 et p s'accommodent ensemble, par une légère variation d'inclinaison, en se mettant dans un même plan. Ce cas se réalise à l'île d'Elbe; mais on ne le retrouve pas dans les cristaux d'adulaire.



Fig. 390. — Portion de granite de la Nièvre, montrant l'orthose (O) en macles de Carlsbad, associé à l'oligoclase (O′) en minces lamelles hémitropes. Nicols croisés. — Grossissement : 80 diamètres. — D'après MM. Fouqué et Michel-Lévy.

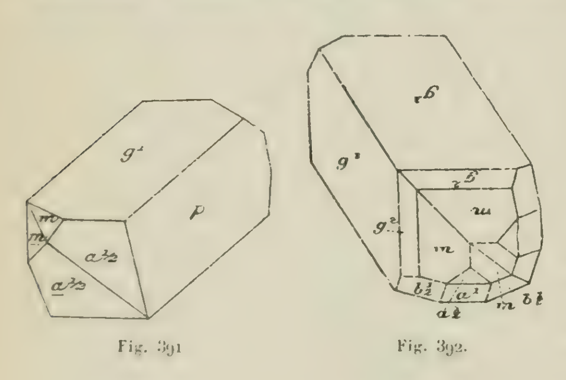


Fig. 391 Fig. 392.

La macle de Carlsbad, très fréquente dans l'orthose des roches, se traduit en plaques minces, aux nicols croisés, par la juxtaposition de deux larges bandes, dont l'une est éclairée quand l'autre est obscure (O de la fig. 390).

4° Plan d'assemblage parallèle et axe d'hémitropie normal au clinodôme $e^1/_2$. Dans cette macle, dite *de Baveno* (fig. 391, 392), les deux cristaux associés offrent généralement l'aspect d'un prisme à peu près quadratique; car l'angle $g^1\ e^1/_2$ étant de 45°3′, l'accouplement de deux biseaux $g^1\ e^1/_2$ donne lieu à un angle $g^1\ {}_1g$ de 90°6′. Dès lors la macle ne s'aperçoit que dans la cassure transversale, ou encore grâce à l'inégale constitution des deux extrémités.

Le clivage, parfait suivant p, est un peu moins facile suivant g^1; très difficile suivant m; quelques cristaux ont une tendance à la séparation facile, suivant une direction voisine de h^1 et la variété *Murchisonite* se clive suivant $a^1/_2$. La cassure est variable, conchoïdale ou esquilleuse. Éclat vitreux, nacré sur p.

Opt. Plan A.O. le plus souvent une des face de la zone $p\,h^1$. La Biss. négative n_p, fixe et située dans g^1, fait avec pg^1 un angle de $+5°$ et avec mg^1 un angle de $-69°$.

Dans les orthoses non déformés par la chaleur, g^1 contient n_m, et n_g coïncide avec ph^1 Dans les orthoses déformés, n_g et n_m permutent. On a $\rho > v$ tant que les axes sont perpendiculaires à g^1 et $\rho < v$ dans le cas contraire. L'écartement des axes est très variable, 2V varie de 0° à 70°. Ce dernier chiffre, qui correspond à $2E = 120°12'$, a été obtenu pour un adulaire. L'angle est toujours faible dans l'orthose déformé. L'écartement des axes est influencé par la chaleur; la modification devient permanente au delà d'un certain degré (600 à 1000°).

$n_g = 1{,}5260$; $n_m = 1{,}524$ (raie D) ; $n_p = 1{,}5190$.

Ch. Les lamelles d'orthose fondent difficilement au chalumeau en un verre bulleux. L'espèce est inattaquable par les acides (sauf l'acide fluorhydrique) et donne un squelette de silice avec le sel de phosphore.

On distingue dans l'orthose les variétés suivantes : *Adulaire* ou orthose limpide, en beaux cristaux hyalins ou partiellement imprégnés de chlorite, à éclat vitreux très prononcé (Saint-Gothard); *Pegmatolite* ou orthose commun, laiteux, le plus souvent rose-chair ou blanc jaunâtre, des roches granitiques et porphyriques, en particulier des pegmatites; *Sanidine* ou *Feldspath vitreux*, variété propre aux roches volcaniques, et caractérisée par une plus forte teneur en soude, ainsi que par un fendillement marqué sur p et sur g^1 (fig. 393). Cette variété a des angles un peu différents de ceux de l'orthose type, conduisant à R.A. = 0,653 : 1 : 0,552 avec $ph^1 = 116°$ et $mm = 119°16'$ à $119°32'$. L'angle 2E peut être nul. C'est à la sanidine que paraît devoir être rattaché l'*Eisspath* du Vésuve, en lames hyalines aplaties suivant g^1.



Fig. 393. — Sanidine (macle de Carlsbad), montrant le fendillement caractéristique de l'espèce. Nicols croisés. — Grossissement : 80 diam. — D'après MM. Fouqué et Michel-Lévy.

A ces variétés principales il convient d'ajouter : l'orthose *opalisant*, avec des jeux de lumière spéciaux sur h^1, attribués à l'intercalation de très nombreuses et très fines lamelles d'albite (1) ; l'orthose *aventuriné*, avec intercalation de petites lamelles d'oligiste et contribuant, de concert avec l'oligoclase, à former ce qu'on appelle la *pierre de soleil;* la *pierre de lune* de Ceylan, à reflets nacrés, etc.

Dans l'adulaire domine ordinairement la macle de Baveno, tandis que la pegmatolite offre en général la macle de Carlsbad et la sanidine une combinaison de cette macle avec l'hémitropie normale à g^1.

Les roches nommées *pétrosilex*, *obsidienne*, *ponce*, *rétinite*, peuvent être, au

(1) Cette indication ne doit être donnée que sous réserves, les auteurs rapportant aujourd'hui cette variété à l'*anorthose*.

moins en partie, considérées comme des variétés compactes d'orthose, où domine la texture amorphe.

On connait des pseudomorphoses par altération d'orthose en kaolin ou muscovite, avec séparation de quartz.

Dans les roches, les petits cristaux d'orthose sont le plus souvent allongés suivant la zone négative pg^1, et offrent la macle de Carlsbad. Les microlithes simples s'éteignent, dans cette zone, suivant des directions qui font avec leur longueur des angles variables entre 0° et 5°. Deux lamelles hémitropes s'éteignent en même temps. L'aplatissement a lieu suivant g^1.

Quelques cristaux sont allongés suivant $h^1 g^1$, avec extinctions variables, dont la valeur, pour g^1, est de 21°.

Utilisé pour la fabrication de la porcelaine, l'orthose offre de l'importance, au point de vue agronomique, en raison de sa richesse en potasse.

On peut rattacher à l'orthose, malgré une teneur en silice qui ne dépasse pas 46 °/₀, le feldspath barytique dit *Hyalophane*, où l'on observe de 15 à 20 °/₀ de baryte avec 7 à 9 °/₀ de potasse. Ce feldspath appartient au même système cristallin que l'orthose et offre presque identiquement les mêmes angles. Ainsi $mm = 118°41'$ et le clivage est parfait suivant p.

2° **Microcline**. $K^2Al^2Si^6O^{16}$. — P.S. = 2,54 à 2,58. — D. = 6.

S. triclinique. R.A. = 0,649 : 1 : 0,55. Angles des arêtes du parallélépipède fondamental : $yz = 90°7'$; $xz = 115°50'$; $xy = 89°55'$; principaux angles dièdres : $mt = 118°31'$; $pm = 111°17'$; $mg^1 = 119°11'$; $pg^1 = 90°16'$.

Le Microcline est un feldspath triclinique à base de potasse, de composition identique avec celle de l'orthose, offrant aussi les clivages p et g^1, mais où l'angle pg^1, au lieu d'être exactement droit, est de 90°16'. Si cet angle ne peut pas toujours être mesuré, du moins on constate l'inégalité des clivages m et t. De plus, les lames parallèles à p, au lieu de s'éteindre suivant $p\,g^1$, ont une direction d'extinction qui fait avec cette ligne un angle de + 5°. C'est aussi de + 5° que la direction d'extinction des lames parallèles à g^1 est inclinée sur pg^1.

Le Microcline, qui abonde dans les pegmatites (Oural, Colorado, Pennsylvanie), possède presque toutes les propriétés extérieures de l'orthose.

Opt. Signe négatif. Biss. n_p voisine de pg^1. Le plan A.O., presque perpendiculaire à p, est incliné de 82 à 83° sur g^1 et l'on a 2V = 83°,7; 2H = 88°,7 avec $\rho > v$; $n_g = 1{,}529$; $n_m = 1{,}526$; $n_p = 1{,}523$.

Les angles d'extinction des microlithes allongés suivant pg^1 varient, pour la zone pg^1, entre 0° et 16°.

Les cristaux de microcline sont en général formés de lamelles extrêmement minces, maclées suivant g^1, ce qui fait naître sur p et sur les hémiorthodômes des stries fines, parallèles, sur p, à pg^1. Souvent les lames de microcline se

montrent, au microscope polarisant, quadrillées à angle droit (fig. 394), par suite de la coexistence de deux séries de lamelles hémitropes, les unes conformes à la loi de l'albite, les autres pour lesquelles le plan d'assemblage est très voisin de $a\ ^1/_4$. Dans ce dernier cas, la face d'accolement fait, avec l'arête pg^1, un angle de 99° dans l'angle obtus ph^1. Comme, pour le microcline, la normale à g^1 diffère à peine de l'arête ph^1, les lamelles de chacune des deux séries, qui ont tourné autour de leurs axes respectifs d'hémitropie, se retrouvent, après cette rotation, avec des orientations optiques presque identiques et doivent s'éteindre ensemble comme font celles qui appartiennent à la position initiale.

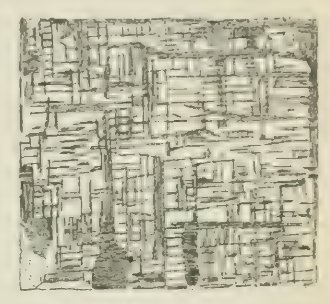


Fig. 394. — Quadrillage du microcline aux nicols croisés. Grossissement : 30 diamètres. — D'après MM. Fouqué et Michel-Lévy.

Ce quadrillage s'observe nettement dans toutes les sections de la zone ph^1, excepté, bien entendu, pour celle qui se trouve parallèle à la face d'accolement dont il vient d'être question. D'ailleurs, l'angle pg^1 étant presque droit, les lamelles conformes à la seconde loi ne font pas naître de stries appréciables sur g^1. Ce n'est donc que par la disparition du quadrillage qu'on peut préciser la position de cette face d'accolement. D'autre part, le même effet de cloisonnement peut quelquefois être produit par des lamelles d'orthose intercalées. On remarque en outre que les bandes hémitropes du microcline ne sont jamais très nettement délimitées, ce qui distingue l'espèce de tous les autres feldspaths tricliniques. Il en résulte, en plaques minces, un aspect moiré.

Au microcline appartient, avec ce qu'on appelait autrefois l'orthose rose-chair de Baveno, l'*Amazonite* ou *pierre des Amazones*, d'une couleur vert-émeraude que la calcination fait disparaître. Cette variété est formée d'une association de lamelles à peu près parallèles à h^1 avec d'autres maclées parallèlement à pg^1, ce qui fait naître un réseau sur p et sur a^1.

La *Perthite* du Canada est un agrégat lamellaire de microcline (ou d'orthose) et d'albite, l'un et l'autre rougeâtres, et la *Microperthite* est une association du même genre, à lamelles hémitropes excessivement fines, qui lui donnent sous le microscope un aspect fibreux.

M. Michel-Lévy a montré (1) que les propriétés optiques de l'orthose pouvaient se déduire de celles du microcline, si l'on supposait que ce dernier présentât des associations submicroscopiques de lamelles hémitropes, suivant les deux lois énoncées. L'orthose ne différerait donc du microcline que par une moindre dimension des éléments simples constituants.

3° **Anorthose**. — Depuis quelques années, on a reconnu l'existence d'un certain nombre de feldspaths, dont la symétrie diffère extrêmement peu de

(1) *Les minéraux des roches*, p. 83.

celle de l'Orthose, mais dans la composition desquels domine la soude (6,5 à 11 %). Aussi les avait-on rangés d'abord sous la dénomination d'*Orthose sodique* (*Natronorthoklas*). Postérieurement, on a établi que tous étaient réellement tricliniques, mais avec un angle pg^1 à peine différent de 90°. On les groupe aujourd'hui sous la rubrique d'**Anorthose** (1), en les considérant comme des mélanges isomorphes du silicate de l'orthose avec celui de l'albite. On peut dire que ce sont des microclines sodiques, avec lamelles hémitropes suivant les deux lois de l'albite et du péricline. Comme on y rencontre quelquefois de la chaux, leur symbole peut s'écrire $(Na^2, K^2, Ca) Al^2Si^6O^{16}$.

Les données cristallographiques sont les suivantes : R. A. = 0,636 : 1 : 0,547 ; $pg^1 = 90°29'$; $mt = 120°48'$; $tg^1 = 119°13'$; $ph^1 = 116°22'$; $mg^1 = 119°55'$. Clivages : p parfait ; g^1 moins parfait, m très difficile. Par une exception que ne présentent pas les autres feldspaths, beaucoup de cristaux d'anorthose sont allongés suivant la zone mt. Les extinctions de la zone pg^1 présentent un maximum de 90° et les lamelles hémitropes suivant la loi du péricline font avec pg^1 un angle de + 4° à + 10°.

Signe **Opt.** négatif. 2V = 46° ; 2E = 72° à 88° ; $n_g = 1,530$; $n_m = 1,529$; $n_p = 1,523$; $\rho > v$.

Le poids spécifique varie entre 2,57 et 2,60. L'anorthose est inattaquable et fond au rouge blanc.

L'espèce a été rencontrée dans les syénites à augite de Norvège, où elle formerait ce qu'on appelait autrefois l'*orthose opalisant*, à cause de ses reflets chatoyants bleuâtres. On la signale aussi dans le *Rhombenporphyr* de Scandinavie, la protogine du Mont Blanc et les laves de Pantelleria. L'anorthose de cette dernière localité se modifie par la chaleur et parait devenir monoclinique entre 86° et 264°.

PLAGIOCLASES

La série des *plagioclases* comprend plusieurs espèces, se distinguant les unes des autres par la nature et la proportion des bases dominantes, ainsi que par la quantité de silice qu'elles contiennent. Les rapports d'oxygène y sont progressivement décroissants, comme l'indique le tableau suivant (en tête duquel on a placé l'orthose et le microcline, pour avoir sous les yeux tout l'ensemble des feldspathides).

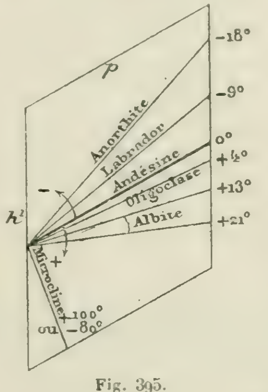
A mesure qu'on descend dans la série, les termes deviennent moins réfractaires, tant à la chaleur qu'aux acides. Ainsi le labrador est partiellement et l'anorthite complètement attaquable par l'acide chlorhydrique. Sauf l'albite, les plagioclases cristallisent facilement par fusion ignée.

(1) Il est bon de se souvenir que le nom d'anorthose avait été employé antérieurement par quelques auteurs pour désigner tous les plagioclases ou feldspaths tricliniques.

ESPÈCES	BASES			RAPPORTS D'OXYGÈNE
	POTASSE	SOUDE	CHAUX	
ORTHOSE	dominante	accessoire	»	1 : 3 : 12
MICROCLINE.	id.	id.	»	1 : 3 : 12
ALBITE	traces	dominante	»	1 : 3 : 12
OLIGOCLASE.	id.	$^5/_8$	$^3/_8$	1 : 3 : 10 à 1 : 3 : 9
ANDÉSINE.	id.	$^3/_5$ à $^1/_3$	$^2/_5$ à $^2/_3$	1 : 3 : 8
LABRADOR.	id.	$^1/_4$	$^3/_4$	1 : 3 : 7 à 1 : 3 : 6
BYTOWNITE	id.	$^1/_5$	$^4/_5$	1 : 3 : 5
ANORTHITE	id.	»	dominante	1 : 3 : 4

Les plagioclases ont des formes très voisines de celles de l'orthose. Dans tous, l'angle *mt* est compris entre 120° et 121°37′ (l'angle *mm* de l'orthose étant de 118°48′) et la différence entre 90° et l'angle pg^1 ne dépasse jamais sensiblement 4°. Les rapports paramétriques sont d'ailleurs très peu différents. Aussi peut-on dire que les plagioclases offrent des formes-limites à symétrie *quasi-binaire*.

Les plagioclases se présentent très rarement en cristaux simples. Presque toujours ils sont formés de minces lamelles hémitropes. Tous peuvent présenter, soit la macle de l'albite, de beaucoup la plus fréquente, soit celle du péricline. Mais, à ce dernier point de vue, les diverses espèces sont très différentes les unes des autres. La face d'association des lamelles, toujours comprise dans la zone ph^1, est plus ou moins inclinée sur p. La figure 395 représente les directions que peut affecter, sur g^1, la trace de cette face d'accolement, qui engendre les stries du plan moyen g^1. On voit que, si la direction des arêtes pg^1 ou h^1g^1 est connue, ce caractère peut offrir un précieux moyen pour distinguer les divers feldspaths (1).



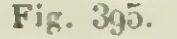

Fig. 395.


Fig. 396. — Association de deux macles dans un plagioclase de gabbro. Grossissement : 12 diamètres. — D'après M. Rosenbusch.

Quand les deux macles de l'albite et du péricline coexistent dans un plagioclase, elles font naître des bandes hémitropes croisées, sous un angle droit dans les sections de la zone ph^1 (excepté dans celle qui est parallèle à la face

(1) Les chiffres qui ont servi à établir cette figure sont ceux qui résultent des travaux relatifs à l'étude microscopique des roches. En opérant sur les cristaux proprement dits des plagioclases et notamment de l'oligoclase, Des Cloizeaux a trouvé que la face d'accolement de la macle-péricline était loin d'être constante.

d'accolement), sous un angle différent de 90° dans les autres sections. Ce dernier cas est celui de la figure 396.

Albite. $Na^2Al^2Si^6O^{16}$. — P. S. = 2,54 à 2,64. — D. = 6 à 6,5.

S. triclinique. R. A. = 0,633 : 1 : 0,557. — Angles plans des arêtes du parallélépipède fondamental : $yz = 94°3'$; $xz = 116°26'$; $xy = 88°9'$. — Principaux angles : $mt = 120°47'$; $pm = 110°50'$; $tp = 114°42'$; $pg^1 = 86°25'$ aigu = 93°35' obtus.

L'albite ou feldspath sodique, qui tire son nom de la blancheur de certains cristaux, contient de 67 à 69 % de silice, avec 18 à 20 % d'alumine et 12 % de soude, à laquelle peuvent s'adjoindre 1 % de potasse et parfois un peu de chaux.

On y observe les combinaisons suivantes : $mtpg^1a^1b^1/_2$ (fig. 397), avec $tg^1 = 119°33'$ et $b^1/_2g^1 = 113°41'$; la même avec g^2, ^2g et $c^1/_2$; etc. La variété

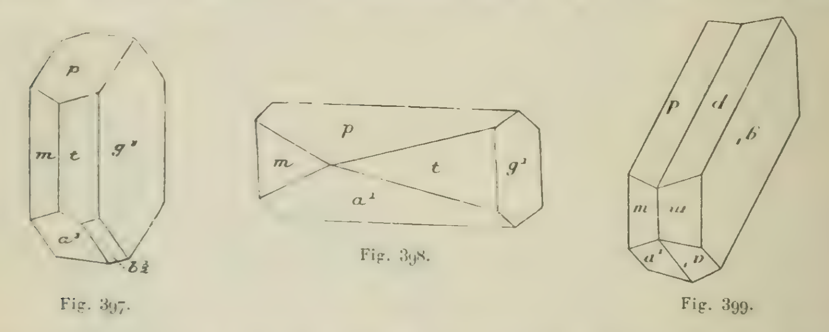


Fig. 397. Fig. 398. Fig. 399.

péricline, en cristaux simples, offre la combinaison $pmtg^1a^1$, avec aplatissement suivant p ou du moins allongement suivant ph^1 (fig. 398).

Les macles sont très fréquentes. La plus habituelle, dans les Pyrénées, le Dauphiné et la Suisse, est la *macle* dite *de l'albite* (1), c'est-à-dire l'hémitropie avec axe normal à g^1, faisant naître une gouttière (fig. 399), avec angle rentrant de 172°48'. On rencontre aussi, surtout dans la variété *péricline*, la macle par accolement suivant une face de la zone ph^1, dont la trace sur g^1 fait avec l'arête pg^1 un angle variable de + 13° à + 21° (fig. 400). Les angles RR sont rentrants ; SS, saillants. L'axe apparent de rotation est sensiblement perpendiculaire à g^1. Cette *macle du péricline*, quand

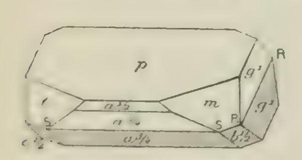


Fig. 400.

elle se répète plusieurs fois, fait naître des stries sur g^1, comme la précédente en fait naître sur p. Ces stries, d'après ce qui vient d'être dit, font avec pg^1 un angle de 13 à 21 degrés. Quelquefois, mais très rarement, l'albite présente une sorte de macle de Carlsbad, avec accolement suivant g^1 et rotation appa-

(1) V. plus haut, p. 322.

rente autour de l'arête *mt*. Il y a des albites où l'on retrouve l'équivalent de la macle de Baveno de l'orthose, les cristaux étant accolés suivant $i^1/_2$. Fréquemment il y a pénétration réciproque de cristaux d'orthose et d'albite, la zone *m m* de l'orthose s'orientant alors comme la zone *mt* de l'albite.

La *macle du Roc Tourné* (fig. 401) se compose de deux groupes de cristaux, maclés chacun selon la loi de l'albite, et associés l'un à l'autre suivant une face qui est très voisine de h^1; mais cet accolement est théorique et, en réalité, il y a interpénétration irrégulière.

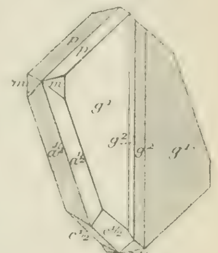


Fig. 401.

Clivage parfait suivant *p*, moins parfait suivant g^1. Cassure inégale. Faces de la zone *mt* striées parallèlement à leur axe. Éclat vitreux, nacré sur *p*. Incolore; de diverses nuances de blanc; rougeâtre, jaunâtre.

Opt. Signe positif. Plan AO fait avec l'axe vertical un angle de 96°16′ et avec la normale à g^1 un angle de 15° à 17°. Biss. n_g inclinée sur cette normale de la même quantité, et sur la normale à *p*, de 77° 19; n_p est à peu près dans g^1. $2V = 77°$; $2H = 80$ à $85°$; $2E = 155°$; $n_g = 1{,}540$; $n_m = 1{,}534$; $n_p = 1{,}532$; $\rho < v$. Faible dispersion horizontale et forte dispersion inclinée.

La direction d'extinction des lames parallèles à *p* fait avec pg^1 un angle de 3°50′ à 4°30′. Par suite, deux lamelles hémitropes d'albite s'éteignent sur *p* suivant des directions faisant entre elles un angle de 8 à 9 degrés. Sur g^1, l'angle d'extinction, avec pg^1, est de $+20°$ (1).

Ch. Fond difficilement sur les bords en un verre clair bulleux. Réact. 5. Inattaquable par les acides.

Très rare comme élément de la pâte même des roches éruptives, l'albite est en filons dans les roches primitives; mais on en trouve aussi dans les calcaires magnésiens du terrain secondaire des Alpes (roc Tourné, col du Bonhomme, près Modane) et on a reconnu récemment qu'elle était très répandue parmi les schistes cristallins disloqués. La variété *péricline*, en assez gros cristaux d'un blanc de lait, fréquemment tapissés de chlorite, se trouve dans des schistes chloriteux.

Oligoclase. $(Ca,Na^2)^2Al^4Si^9O^{26}$. — P. S. = 2,62 à 2,65. — D. = 6.

S. triclinique; R. A. = 0,632 : 1 : 0,552. — Angles des arêtes du parallélépipède : $yz = 93°4'$; $xz = 116°22'$; $xy = 90°4'$. — $mt = 120°42'$; $pm = 110°55'$; $tp = 114°40'$; $pg^1 = 93°28'$; $tg^1 = 120°24'$.

L'oligoclase, ou feldspath sodico-calcique, ne contient plus que 62 % de silice; la soude y varie de 8 à 9 %, presque toujours associée à un peu de potasse; la chaux entre pour 4 à 7 % et l'alumine atteint 23 à 25 %.

(1) L'angle aigu est compté positivement quand la direction d'extinction s'éloigne de pg^1 dans le sens de la marche des aiguilles d'une montre.

Formes observées : $mtg^2\ {}^2gg^1\ pa^1\ a^1/_2\ b^1/_2\ c^1/_2$; la même avec $i^1/_2$ (fig. 402); $mtg^3/_2\ {}^3/_2gg^1\ pa^1\ d^1\ c^1/_2\ f^1\ b^1/_2$; etc.

Macles suivant la loi de l'albite, avec nombreuses stries sur p, ou conformément à la loi du péricline, avec stries sur g^1, faisant relativement à pg^1 un angle de $+4°$, et aplatissement suivant p; macle de Carlsbad.

Clivage net suivant p, moins net suivant g^1.

Cassure inégale; éclat vitreux; couleur variable, fréquemment verdâtre.

Opt. Signe négatif, excepté pour la variété la plus voisine de l'albite. Plan A. O. oscille de part et d'autre de p, la Biss. étant presque perpendiculaire au plan g^1, sur la normale duquel elle est inclinée de $+11°$ à $-6°$. $\rho < v$. $2V = 85$ à $90°$; $2H = 90°$; $n_g = 1{,}542$; $n_m = 1{,}538$; $n_p = 1{,}534$. Les extinctions sur p ont lieu à $+1°$ de pg^1 et, sur g^1, à $+5°$ de la même arête.

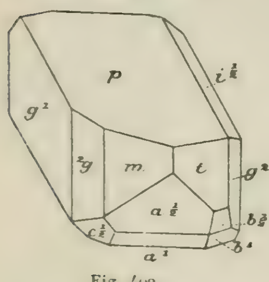


Fig. 402.

Difficilement fusible en verre clair, l'oligoclase est inattaquable par les acides, excepté quand elle contient beaucoup de chaux.

La variété dite *pierre de soleil*, dont une portion appartient à l'orthose et le reste à l'oligoclase, donne des reflets aventurinés, dus à des réflexions sur les parois de petites fissures et principalement sur des inclusions de fer oligiste.

Dans les plaques minces, l'oligoclase se distingue par l'extrême finesse et la régularité de ses lamelles hémitropes (se reporter à la fig. 390).

On a désigné sous le nom d'**Andésine** (à cause de la chaîne des Andes), en lui attribuant le rapport 1 : 3 : 7, une variété feldspathique répandue au milieu de diverses roches trachytiques ou porphyriques. D'après Ch. Sainte-Claire-Deville, l'andésine, où l'on trouve toujours de l'eau et de l'acide carbonique, ne serait qu'un produit d'altération de l'oliglocase. Cependant on paraît aujourd'hui disposé à la regarder comme une véritable espèce, intermédiaire entre l'oligoclase et le labrador ($pg^1 = 93°46'$).

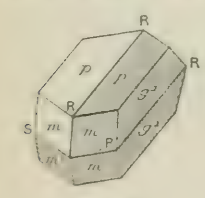


Fig. 403.

La figure 403 représente une forme habituelle aux cristaux doublement maclés de l'andésine de l'Estérel. Les angles RR sont rentrants; en S aboutit un angle saillant.

La proportion de silice varie de 56 à 58 % et la chaux (9 à 10 %) est en plus grande quantité que dans l'oligoclase, la soude variant de 6 à 7 et l'alumine de 26 à 28 %. La macle du péricline s'y fait exactement suivant p et les extinctions, tant sur p que sur g^1, ont lieu presque parallèlement à pg^1. Le signe optique est positif et l'on a $2V = 88°$; $\rho > v$; $n_g = 1{,}556$, $n_m = 1{,}553$; n_p 1,549.

Il existe une andésine plus voisine de l'oligoclase, avec rapport d'oxygène compris entre 1 : 3 : 7 et 1 : 3 : 8, dont le signe optique est négatif.

Au chalumeau, l'andésine fond beaucoup plus facilement que l'albite.

Labrador. (Ca,Na^2) $Al^2Si^3O^{10}$. — P. S. = 2,68 à 2,71. — D. = 6.

S. triclinique. R. A. = 0,637 : 1 : 0,555. — Angles des arêtes du parallélépipède : $yz = 93°21'$; $xz = 116°3'$; $xy = 89°54'$. — mt 121°37' ; $pm = 110°50'$; $tp = 113°34'$; $pg^1 = 93°56'$.

Le Labrador ou *Labradorite*, ainsi nommé de la côte du Labrador, où se rencontre la variété opalisante, est un feldspath basique, renfermant de 50 à 53 °/₀ de silice. La chaux y varie de 12 à 14 °/₀, tandis que la soude ne dépasse pas 5 °/₀, la proportion d'alumine montant à 30 ou 32 °/₀.

Formes observées : $g^1pa^1/_2$; $mg^1tpa^1/_2e^1/_2$; etc. Macles de l'albite, du péricline (avec stries sur g^1, inclinées de — 2° à — 9° sur pg^1), et quelquefois de Carlsbad. Stries fréquentes sur p. Clivage p facile ; g^1 difficile.

Éclat vitreux, généralement gris ; certains cristaux de l'île Saint-Paul (Labrador) offrent sur g^1 de magnifiques reflets chatoyants bleus, verts, jaunes et rouges, causés sans doute par des phénomènes de réflexion et d'absorption, liés à la présence d'inclusions étrangères.

Opt. Signe positif. 2V = 77° ; $n_g = 1,562$; $n_m = 1,557$; $n_p = 1,554$; $\rho > v$.

Les axes optiques occupent une position analogue à celle qu'ils ont dans l'albite. La Biss., à peu près perpendiculaire à pg^1, fait, avec la normale à g^1, un angle de + 31°,4 et, avec la normale à p, un angle de 56°. Le plan A. O. est défini par l'angle de 83°,1, que fait la bissectrice obtuse avec la normale à g^1 et par l'angle de 66°,6, que fait le plan pg^1 avec celui qui contient g^1 et la bissectrice obtuse. Les plaques parallèles à g^1 laissent voir des indices de lemniscates, sans points d'axes visibles et avec une seule portion d'hyperbole. Il en est de même des plaques parallèles à p.

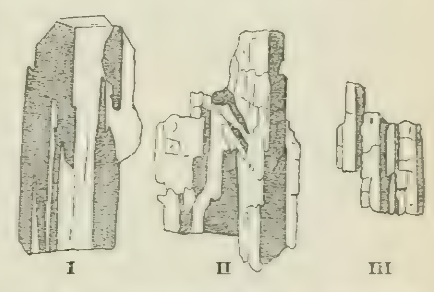


Fig. 404. — Cristaux de Labrador aux nicols croisés. Grossissement : I = 120 diamètres ; II, III = 150 diamètres. — D'après MM. Fouqué et Michel-Lévy.

Ch. Fond, un peu plus facilement que l'orthose et que l'oligoclase, en verre blanc semi-transparent. Difficilement, mais complètement attaqué par l'acide chlorhydrique avant ou après calcination.

Le labrador abonde dans les roches basiques, où il offre des cristaux hémitropes, à lamelles mieux délimitées suivant g^1 que dans tout autre feldspath, mais de dimensions très inégales et de largeur relativement grande (fig. 404), avec directions d'extinction faisant, sur p, un angle de — 10° avec l'arête pg^1, tandis que l'extinction sur g^1 se fait à — 25° de la même arête. L'allongement des petits cristaux a lieu suivant pg^1 et il est de signe négatif.

La **Bytownite**, de densité 2,71, est un feldspath plus calcifère que le labrador. La silice y tombe à 46 ou 48 °/₀, tandis que l'alumine monte à 34

ou 35 et la chaux à 17 ou 18 %, la soude restant comprise entre 1 et 2 %. Le rapport d'oxygène y est voisin de 1 : 3 : 5 et le maximum des angles d'extinction, dans la zone pg^1, est de — 45°.

Le nom de Bytownite avait été créé, dans l'origine, pour un minéral canadien, où M. Zirkel a fait voir qu'il y avait seulement mélange d'anorthite avec hornblende, quartz et magnétite. Mais M. Tschermak a repris ce nom pour l'appliquer à un feldspath intermédiaire entre le labrador et l'anorthite, et dont la présence a été constatée dans les gabbros.

Anorthite. $CaAl^2Si^2O^8$ ou $Ca^2Al^4Si^4O^{16}$. — P. S. = 2,69 à 2,75. — D. = 6.

S. triclinique : R. A. = 0,635 : 1 : 0,550 ; mt = 120°30′ ; pm = 110°40′ ; tp = 114°7′ ; pg^1 = 85°50′ ; ph^1 = 116°3′.

C'est, par excellence, le feldspath basique et calcaire. On y trouve 43 % de silice, avec 36 à 37 % d'alumine et jusqu'à 20 % de chaux et très peu d'alcalis.

Les cristaux sont généralement très riches en facettes, mais d'assez petites dimensions, p, m, t, h^1, g^1, plusieurs hémidômes et jusqu'à 14 quartopyramides. Macle de l'albite. Macle du péricline avec stries inclinées de — 18° sur pg^1. Clivage p parfait : g^1 beaucoup moins net.

Éclat vitreux très vif, nacré sur p ; souvent très limpide.

Opt. Signe négatif ; $\rho > v$; 2V = 77°. La Biss. fait avec la normale à g^1 un angle de + 44°5 et la bissectrice obtuse fait avec cette même normale un angle de 52°,7. Enfin l'angle de cette normale avec l'axe d'élasticité moyenne est de 69°1, s'ouvrant dans un plan qui fait, avec le plan de zone pg^1, un angle de 112 degrés. La valeur moyenne de l'indice est 1,582 et la biréfringence s'élève à 0,013. Les lames parallèles à p et à g^1 laissent voir sur le côté l'émergence de l'un ou de l'autre des axes optiques. La direction d'extinction des lames taillées suivant p, comme de celles taillées suivant g^1, fait avec pg^1 un angle d'environ — 37° ; en sorte que deux lamelles hémitropes s'éteignent à 74° l'une de l'autre. Ce chiffre, très différent de ceux des autres feldspaths, permet de distinguer l'anorthite, qui est assez fréquente dans les roches basiques, où ses lamelles sont larges et assez bien délimitées (fig. 405).



Fig. 405. — Anorthite en lamelles hémitropes dans une norite. Nicols croisés. Grossissement : 30 diam. — D'après MM. Fouqué et Michel-Lévy.

Ch. Fond plus difficilement que le labrador, en verre bulleux et incolore. Complètement attaquable, sans formation de gelée. Réact. 89.

On a désigné sous le nom de *Saussurite* ou *Jade de Saussure* une substance

feldspathique gris-verdâtre, dont la densité s'élève jusqu'à 3,38 et qui entre dans la composition de certaines variétés de gabbro ou euphotide.

La Saussurite n'est qu'un produit d'altération des feldspaths plagioclases et principalement du labrador, de la bytownite et de l'anorthite; elle consiste en un agrégat d'épidote ou de zoïsite, parfois accompagné de grenat ou de scapolite, de quartz et de calcite. En même temps, la soude devenue libre engendre de l'albite (1).

Isomorphisme des plagioclases. — La similitude des éléments cristallographiques dans les plagioclases suggère l'idée qu'il doit y avoir, entre les diverses espèces, des relations satisfaisant aux lois générales de l'isomorphisme. Telle est en effet la thèse qui a été développée par M. Tschermak. Ce savant a fait observer que les plagioclases ont tous des compositions qui peuvent être exactement représentées par la formule :

$$m(Na^2Al^2Si^6O^{16}) + n(Ca^2Al^4Si^4O^{16}),$$

m et *n* étant des nombres entiers simples.

Le premier des deux symboles est la formule chimique de l'Albite, qu'on peut désigner en abrégé par Ab; le second répond exactement à la composition de l'Anorthite An, dont il représente la formule doublée. M. Tschermak en conclut que les plagioclases sont des mélanges isomorphes d'albite et d'anorthite, répondant à la formule générale $Ab^m + An^n$. Dans cette conception, les espèces que nous avons décrites représenteraient moins des types étroitement définis que des combinaisons plus stables, autour desquelles d'autres peuvent venir se grouper. Ainsi, les plagioclases se répartiraient comme il suit :

Depuis Ab^1An^0 jusqu'à Ab^8An^1, on aurait affaire à l'Albite; depuis Ab^6An^1 jusqu'à Ab^2An^1, à l'Oligoclase; de Ab^3An^2 à Ab^4An^3, à l'Andésine; de Ab^1An^1 à Ab^1An^2, au Labrador; de Ab^1An^3 à Ab^1An^6, à la Bytownite; enfin de Ab^1An^8 à Ab^0An^1, à l'Anorthite. Les séries intermédiaires s'appelleraient, au moins provisoirement, oligoclase-andésine, andésine-labrador, etc.

Cette opinion est appuyée sur les faits suivants : les propriétés cristallographiques des feldspaths intermédiaires sont elles-mêmes intermédiaires entre celles des deux types extrêmes. Il en est de même des densités, qui vont en croissant régulièrement de l'albite à l'anorthite. De plus, le volume moléculaire de l'albite est exactement égal à celui de l'anorthite (après doublement), ce qui rend très vraisemblable l'association des deux molécules. Enfin M. Schuster, à la suite d'une série d'expériences sur les directions d'extinction des divers feldspaths dans les faces p et g^1, a été conduit à poser la règle suivante : l'angle y que fait la direction d'extinction avec l'arête pg^1 peut être représenté par le relation

$$y = f(x),$$

x étant le rapport entre les quantités d'albite et d'anorthite associées pour

(1) Rosenbusch, *Mikr. Physiographie*, p. 543.

former le feldspath considéré. De son côté Mallard (1) a montré que l'angle d'extinction, pour une lame d'un feldspath donné, pouvait se déduire théoriquement, par une équation du premier degré, des proportions des deux éléments Ab et An. De cette façon, les propriétés physiques des feldspaths seraient bien, comme c'est le cas pour les véritables mélanges isomorphes, une sorte de moyenne arithmétique entre les propriétés similaires des éléments constituants.

L'isomorphisme des plagioclases ne serait d'ailleurs nullement en contradiction avec l'existence d'un certain nombre de types prépondérants, qui formeraient les espèces précédemment décrites. Le fait est général pour la plupart des mélanges isomorphes, dont chacun offre quelques groupements, sans doute plus stables et, pour ce motif, plus fréquemment réalisés que les autres. D'ailleurs les analyses établissent nettement qu'il y a des cristaux de plagioclase dont la composition est intermédiaire, soit entre l'albite et l'oligoclase, soit entre le labrador et l'anorthite. De cette manière, l'isomorphisme des feldspathides serait assez voisin de celui des deux corps les plus parfaitement isomorphes que l'on connaisse en minéralogie, le carbonate de magnésie et le carbonate de fer.

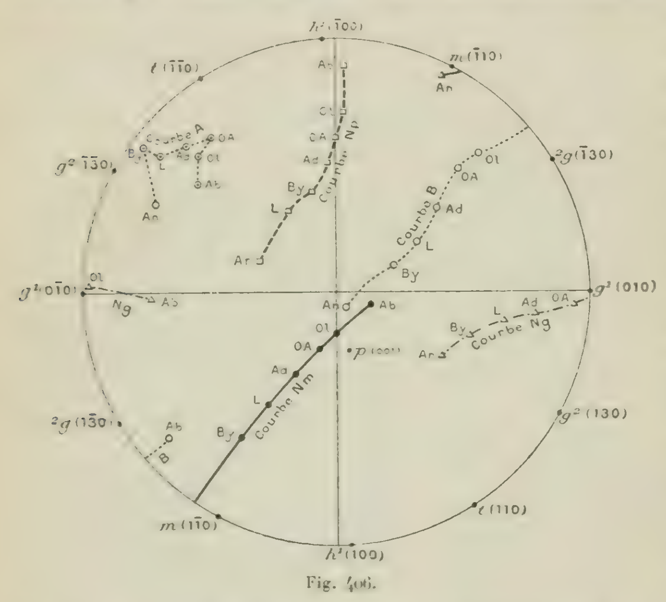


Fig. 406.

Détails complémentaires sur les propriétés optiques des plagioclases. — Le rôle très important que jouent les feldspaths dans les roches éruptives, où souvent ils apparaissent à l'état de très petits cristaux, a provoqué de nombreuses et délicates recherches en vue de déterminer leur espèce par les caractères optiques. MM. Rosenbuch, Max Schuster, Fouqué, Michel-Lévy, des Cloizeaux, Lacroix, von Fédorow, s'y sont particulièrement appliqués. Il n'entre pas dans notre plan d'analyser ces différents travaux. Nous rappellerons seulement que M. Michel-Lévy a donné une méthode, fondée sur l'éclairement commun des éléments d'un cristal polysynthétique, pour reconnaître si ces éléments sont de nature différente, ou s'ils correspondent à deux séries de lamelles hémitropes d'une même espèce (2).

(1) *Bull. Soc. min.*, IV, p. 103 (1881). — (2) *Les Minéraux des roches*, p. 73.

Le même auteur a construit (1) des épures qui, pour chaque espèce de plagioclase, font connaître, dans les diverses faces possibles, la valeur de l'angle d'extinction, rapportée à la trace du plan g^1.

Nous nous contenterons ici de donner, à titre d'indication, un résumé (fig. 406) de l'épure qui fait connaître la position, pour les diverses espèces : 1° des deux axes optiques, A et B ; 2° des trois axes d'élasticité optique n_g, n_m, n_p. La figure est une perspective stéréographique sur un plan perpendiculaire à l'arête prismatique h^1g^1. Les pôles g^1, h^1, m, t, g^2, ${}^2g$ sont ainsi sur le cercle fondamental, le pôle p occupant une position peu éloignée du centre. (Les formes primitives des plagioclases diffèrent assez peu les unes des autres pour qu'on ait pu, sans erreur sensible, représenter sur la figure chacune de ces différentes faces par une seule position, sans distinction d'espèce.)

GENRE FELDSPATHOIDE

En tête des *felspathoïdes* viennent se ranger des minéraux qui jouent, dans certaines roches éruptives, et surtout dans celles de la série moderne, un rôle tout à fait semblable à celui des feldspathides dans les roches anciennes. Ces minéraux, qui sont les *amphigénides* de Ch. Sainte-Claire Deville, diffèrent des fedspathides à la fois par le genre de leur symétrie et par le rapport d'oxygène, qui est 1 : 3 : 8 ou 1 : 3 : 4, le dernier chiffre étant un multiple de 4, tandis que, chez les feldspathides, c'est le plus souvent un multiple de 3.

Leucite. $K^2Al^2Si^4O^{12}$. — P. S. = 2,45 à 2,5. — D. = 5,5 à 6.

S. cubique (en apparence).

La Leucite ou *Amphigène* est un feldspathoïde potassique, offrant le rapport d'oxygène 1 : 3 : 8 et renfermant 55 % de silice avec 23 % d'alumine et 15 à 22 % de potasse, qui peut être, pour une petite partie, remplacée par la soude.

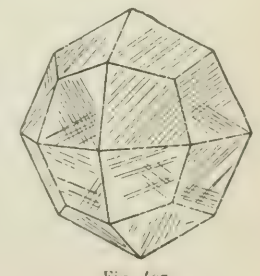


Fig. 407.

La forme dominante est le trapézoèdre a^2. Mais on a remarqué depuis longtemps, à la surface des cristaux, en apparence très bien formés, mais de couleur terne et grisâtre, des stries régulières, dont la figure 407 donne l'idée, d'après le *Lehrbuch* de M. Tschermak. Ces stries indiquent une macle incompatible avec la symétrie cubique. D'ailleurs les angles mutuels des faces ne sont pas tels que la théorie l'exige. Aussi M. vom Rath a-t-il émis, il y a quelques années, l'opinion que le pseudotrapézoèdre de la leucite était formé, en réalité, par la combinaison d'un octaèdre quadratique a^2 avec un dioctaèdre a_2. Depuis, l'étude des propriétés optiques a conduit Mallard à admettre que la

(1) *Études sur la determination des feldspaths*, Paris, Baudry, 1894 et 1896. — Voir aussi Lacroix, *Minéralogie de la France*, II, p. 133.

symétrie de la leucite est rhombique, peut-être même triclinique, avec formes-limites cubiques, l'apparence cubique résultant d'un groupement conforme aux règles antérieurement exposées. M. Treptow, considérant la leucite comme rhombique, lui attribue, pour R. A., 0,965 : 1 : 0,494, tandis que Mallard admet 0,992 : 1 : 0,969, ce qui correspond à peu près au doublement de l'un des paramètres. Dans ce cas, le trapézoèdre usuel résulterait de l'association des trois formes b^1, a_3 et e_3. Tandis que, dans un trapézoèdre du système cubique, tous les angles devraient être égaux à 131°49′, on aurait ici a_3a_3 = 132°16′ sur l'arête horizontale = 130°44′ sur l'autre ; e_3e_3 = 131°47′ sur l'arête horizontale = 130°33′ sur l'autre ; enfin b^1b^1 = 132°53′ sur l'arête contenue dans g^1 = 132°34′ sur celle contenue dans h^1.

Cependant, d'après M. Klein, une plaque mince de leucite, chauffée au-dessus de 265°, devient complètement isotrope, ce qui ne l'empêche pas, quand elle se refroidit, de reprendre rapidement ses propriétés biréfringentes. De plus, les inclusions solides de la leucite sont indépendantes, dans leur disposition, des contours qui limitent les plages d'orientations optiques différentes. Aussi beaucoup de minéralogistes admettent-ils que la biréfringence de la leucite tient à un état de tension moléculaire, causé par l'influence que le refroidissement a exercée sur un cristal qui avait commencé par être exactement cubique.

Clivage très imparfait (suivant des faces de notation b^1 dans l'hypothèse cubique). Cassure conchoïdale ; blanc grisâtre ou gris de cendre. Poussière blanche ; éclat vitreux, quelquefois résineux dans la cassure. Infusible au chalumeau ; soluble dans les acides sans faire gelée. Réact. 78.

Opt. Signe positif, n_g = 1,509 ; n_p = 1,508 (raie D). Biss. n_g perpendiculaire à p.

L'amphigène ou leucite existe en abondance dans certaines laves du Vésuve (leucitophyres, leucotéphrites, etc.), où les trapézoèdres sont isolés et très réguliers ; les plus gros s'observent à Rocca Monfina, près de Naples.

La leucite est riche en inclusions de diverses natures (voir les figures 366 à 368, page 380). Dans les roches en plaques minces, les sections de leucite sont octogonales ou arrondies et restent fréquemment éteintes entre les nicols croisés.

Etym. : De λευκός, blanc ; le nom d'amphigène, basé sur la croyance erronée à un double clivage et sur l'hypothèse non moins fautive de deux formes primitives, doit être rejeté (1).

Néphéline. $(Na, K)^2Al^2Si^2O^8$ ou $(Na, K)^8Al^8Si^9O^{34}$. — P. S. = 2,58 à 2,64. — D. = 5,5 à 6.

S. hexagonal. R. A. = 1 : 0,836 (2) ; pb^1 = 136°1′ ; pa^1 = 120°53′.

(1) Dana, *System*, 1875, p. 335. — (2) Zirkel, d'après Kokscharow, donne R. A. = 1 : 0,839, ce qui correspond à pb^1 = 135°55′.

Tandis que la leucite est potassique et pseudo-cubique, la néphéline est sodique (15 %) et potassique (1 à 7 %) avec chaux (1 à 10 %). Le rapport d'oxygène est 1 : 3 : 4 et la proportion de silice est d'un peu moins de 45 %, l'alumine atteignant 33,46 %.

Combinaisons observées : *mp*; *mpb*^{1}; *mpb*^{1}*b*$^1/_2$; *mh*^{1}*pb*^{2}, etc. ; clivages *m* et *p* imparfaits. Éclat vitreux; incolore, grisâtre.

Opt. Signe négat. — $n_o = 1,5469$; $n_e = 1,5422$. Biréfringence : 0,0047.

Fond difficilement en verre bulleux. Réact. 88; un fragment, porté dans l'acide azotique, devient nébuleux (d'où le nom de néphéline).

Dans les roches, la néphéline se présente en petits prismes hexagonaux, de dimensions à peu près égales dans tous les sens.

On a donné le nom d'*Éléolite* (ou Elæolite), c'est-à-dire *pierre grasse* (huileuse), à une variété de néphéline, d'aspect gras ou résineux, qui s'observe le plus souvent à l'état compact, sans autres indices de cristallisation que des fentes grossièrement parallèles, et qui est à la néphéline ce que l'orthose ordinaire est à la sanidine. On la trouve dans certaines syénites, appelées pour ce motif syénites éléolitiques. L'éléolite fond plus facilement que la néphéline ordinaire, dont elle partage d'ailleurs la composition chimique.

La *Davyne* (P. S = 2,429) est une néphéline hydratée, contenant un peu de chaux et d'acide carbonique, fondant avec bouillonnement et optiquement positive ($n_o = 1,515$; n_e 1,519). On la trouve au Vésuve.

On rattache encore à la Néphéline, à titre de produits d'altération, la *Cancrinite* (P. S. = 2,42 à 2,46. — D. = 5 à 5,5), en masses lamellaires rosées, jaunes ou vertes, à clivage *m* parfait (1); la *Gieseckite* (P. S. = 2,75 à 2,85. — D. = 3 à 3,5), en prismes hexagonaux d'un gris verdâtre, espèce hydratée, d'où la soude a disparu, remplacée par alumine, fer et magnésie; la *Liebenérite* (2) (P. S. = 2,79 à 2,81. — D. = 3,5), en petits prismes basés verdâtres, également hydratée et pauvre en soude, etc. Ces deux dernières variétés sont complètement transformées en produits micacés.

Outre les minéraux qui viennent d'être décrits, nous comprendrons, dans le groupe des feldspathoïdes, plusieurs espèces qui peuvent être considérées comme des feldspaths basiques, renfermant une certaine proportion d'acide sulfurique et de chlore. Ce sont l'Haüyne, la Noséane, l'Outremer et la Sodalite.

Haüyne. $(Na^2,Ca)^3(Al^2)^2Si^4O^{20}S = 2\{(Na^2,Ca)Al^2Si^2O^8\} + (Na^2,Ca)SO^4$.
P. S. = 2,4 à 2,5. — D. = 5 à 5,5.

S. cubique.

L'Haüyne (dédiée à Haüy) offre dans son silicate le rapport 1 : 3 : 4, lorsqu'on en défalque, comme on l'a fait ci-dessus, la quantité de bases nécessaire

(1) D'après MM. Michel-Lévy et Lacroix, la Cancrinite s'éloigne de la Néphéline par sa très forte biréfringence, égale à 0,029. Son signe optique est négatif et $n_e = 1,499$. —
(2) M. Tschermak considère la Liebenérite comme alliée au mica muscovite.

pour saturer l'acide sulfurique. On y trouve 35 %. SiO^2; 7 à 12. CaO; 10 à 18. Na^2O; 5 à 15. K^2O et 12 à 13. SO^3, avec trace de chlore. Mais l'analyse est difficile, à cause du peu d'homogénéité du minéral.

Combinaisons observées : b^1 : a^1b^1; pb^1; b^1a^2. Clivage quelquefois distinct suivant b^1. Cassure inégale; translucide; éclat vitreux; fragile. Couleur bleu de ciel plus ou moins foncé ou grise, brune, jaunâtre. La couleur bleue est attribuée à un sulfure de sodium. Indice : 1,496. Anomalies optiques assez fréquentes.

Ch. Décrépite en se décolorant et fond difficilement en verre bleu verdâtre. Réact. 44. Se décolore et fait gelée avec l'acide chlorhydrique, en dégageant à peine une trace d'hydrogène sulfuré.

L'Haüyne se présente en cristaux ou en grains cristallins dans un grand nombre de roches volcaniques, où elle est remarquable par l'abondance des inclusions. Dans les plaques minces, ses sections sont carrées ou hexagonales, souvent entourées d'une couronne opaque de décomposition.

La **Noséane** (dédiée à M. Nose) est une variété non calcifère d'Haüyne, également assez répandue dans les roches volcaniques, où elle se présente en petits dodécaèdres rhomboïdaux et en grains noirâtres ou grisâtres. — P. S. = 2,18 à 2,39. — D. = 5,5. Indice = 1,46. On ne peut, dans les plaques minces, la distinguer de l'Haüyne que par les réactions microchimiques, qui mettent en évidence l'absence de la chaux. Son meilleur gisement est le leucitophyre de Rieden, près du lac de Laach.

L'**Outremer** ou **Lapis-Lazuli** (que quelques auteurs identifient avec l'Haüyne, malgré une proportion plus forte de silice) est aussi une sorte de feldspath sulfaté avec chlore, de forme cubique (b^1; pb^1) quand il est cristallisé et d'un très beau bleu, coloration qu'on attribue, soit à un composé de soufre, de sodium et de fer, soit à un sulfure d'aluminium.

L'analyse donne 45 à 46 %. SiO^2; 11 à 30. Al^2O^3; 10. Na^2O; 4 à 24. CaO; 2 à 6. SO^3; 1 à 3. S; 1 à 4. Fe^2O^3 et 0,5. Cl. — P. S. = 2,38 à 2,45. — D. = 5,5.

Fond assez difficilement au chalumeau en verre blanc; la poudre se décolore et se dissout dans l'acide chlorhydrique avec formation de gelée et dégagement d'un peu d'hydrogène sulfuré.

L'Outremer se trouve généralement en masses compactes, avec pyrite et mica disséminés, dans des calcaires grenus anciens en Asie (Pamir, Baïkal). Il est également rejeté par les volcans (la Somma, Albano). La poudre de lapis a été autrefois employée pour la peinture.

MM. Brögger et Backström (1) croient que la matière colorante du Lapis,

(1) *Groth's Zeitschrift*, XVI, p. 186; XVIII, p. 231.

pour laquelle ils proposent le nom de *Lasurite*, est un minéral analogue à la Sodalite, où le composé Al(NaS³) s'introduirait à la place du groupe Al(NaSO⁴). Cette lasurite contiendrait 32,50. SiO^2; 27,60. Al^2O^3; 19,45. Na^2O; 6,47. CaO; 10,46. SO^3; 2,71. S.

Sodalite. $Na^4Al^3Si^3O^{12}Cl$, ou, en doublant, 3 { $Na^2Al^2Si^2O^8$ } + 2 { NaCl } — P. S. = 2,27 à 2,34. — D. = 5,5.

S. cubique.

Dans la Sodalite (qui doit son nom à la soude), le chlorure de sodium joue un rôle analogue à celui du sulfate dans l'Haüyne.

L'analyse donne 37 °/₀. SiO^2; 31 à 32. Al^2O^3; 25. Na^2O et 5 à 7. Cl.

Combinaisons observées : b^1; bp^1; b^1a^1; pb^1a^2. — Clivage b^1 assez net. Incolore, verte ou bleuâtre. Fond en verre bulleux. S'attaque en faisant gelée. Réact. 19 et 88. Indice = 1,483.

La Sodalite est très constante dans les syénites éléolitiques. On l'observe aussi dans les trachytes et les phonolites. Ses sections sont généralement carrées ou hexagonales.

C'est encore au genre feldspathoïde que nous semblent devoir être rattachés certains silicates alumineux et lithinifères, qui se présentent en masses laminaires clivables, assez analogues au feldspath, dans des roches granitiques ou pegmatoïdes.

Le premier est le **Triphane** ou **Spodumène**, $Li^2Al^2Si^4O^{12}$. — P. S. = 3,13 à 3,19. — D. 6,5 à 7.

S. monoclinique. R. A = 1,124 : 1 : 0,635. — $mm = 87^0$; $ph^1 = 110^0 20'$; $b^{1/2}b^{1/2}$ adj. = $116^0 30'$ (1).

Le triphane renferme 63 °/₀. SiO^2; 29. Al^2O^3; 5,5. Li^2O, avec un peu d'alcalis, de chaux, de fer et d'eau.

Les cristaux offrent parfois la combinaison $mh^1g^1pe^{1/2}b^{1/4}$. Clivage h^1 parfait; m moins parfait. Cassure inégale. État vitreux. Blanc-verdâtre ou vert-pomme, parfois rose.

Opt. Signe posit. A. O. dans g^1. Biss. inclinée sur l'axe vertical de -26^0. $2V = 54$ à 60^0 (rouge); $n_g = 1,676$; $n_m = 1,666$; $n_p = 1,660$.

Ch. Réact. 1. Se boursoufle et fond facilement. Donne un squelette avec le sel de phosphore. Inattaquable par les acides, même l'acide fluorhydrique.

Étym. : Le nom de *Triphane* vient de l'existence de trois clivages (dont un à peine indiqué), et celui de *Spodumène* dérive de σποδός, cendre, à cause de la couleur cendrée que prend le minéral sous le chalumeau.

(1) Zirkel donne $116^0 19'$, d'après Dana, avec R. A. = 1,124 : 1 : 0,631.

La seconde espèce est le **Pétalite**, $Li^2Al^2Si^8O^{20}$, dont le type cristallographique est fourni par le **Castor** de l'île d'Elbe. Ce minéral est extrêmement riche en silice. Il en renferme jusqu'à 79 %. La proportion de lithine est de 2,7 à 5 %; celle de soude, de 2 %.

P. S. = 2,39 à 2,56. — D. = 6,5.

S. monoclinique. R. A. = 1,153 : 1 : 0,744; $mm = 86°20'$; $ph' = 112°26'$; $po^1/_2 = 141°23'$.

Combinaison $po^3/_4 o^1/_2 h^1 m g^3 g^1 e^1/_2$.

Clivages : p parfait; $o^1/_2$ facile.

Opt. Biréfringence énergique; signe positif $\rho < \upsilon$. Biss. normale à g^1; Bissectrice obtuse inclinée sur pg^1 de — 3°, le plan A. O. coïncidant presque avec p. $2V = 83°24'$ (jaune) : $2H = 86°30'$. $n_g = 1,516$; $n_m = 1,510$; $n_p = 1,504$ (raie D).

Le Pétalite est incolore, blanc ou gris, par exception verdâtre ou rougeâtre.

Ch. Réact. 1, surtout avec l'aide du spath fluor et du bisulfate de potasse. Fond tranquillement en émail blanc. Inattaquable par les acides, sauf l'acide fluorhydrique.

Étym. : Le nom de *Pétalite*, tiré de *pétale*, fait allusion à la disposition foliacée des clivages, tandis que la désignation de *Castor* rappelle la fréquente association du minéral avec un silicate d'alumine, cæsium et lithium, de cristallisation cubique, voisin de la Leucite et auquel on s'était plu à attribuer le nom de **Pollux**. Quelques auteurs réunissent le triphane et le pétalite au pyroxène.

Non loin du Pétalite, par sa composition, vient se placer la **Milarite**, $HKCa^2Al^2Si^{12}O^{30}$ (P. S. = 2,59. — D. = 5,5 à 6), dont les cristaux limpides, à symétrie rhombique (R. A. = 0,579 : 1 : 0,221), résultent de groupements qui font naître une apparence hexagonale (1).

FAMILLE DES MICAS

On désigne depuis longtemps sous le nom générique de *Micas* (2) tout un groupe de minéraux, caractérisés par un clivage basique extrêmement facile, qui procure leur division en paillettes minces, à la fois flexibles et élastiques. Les cristaux, le plus souvent imparfaits, rappellent tantôt la symétrie hexagonale, tantôt seulement celle des systèmes rhombique et monoclinique. Les axes optiques, rapprochés dans certaines variétés au point de se confondre, sont très écartés dans d'autres; et l'on remarque que les premières étant surtout magnésiennes, les secondes sont principalement potassiques. Les analyses correspondent en général au rapport d'oxygène 1 : 1 : 2, c'est-à-dire que la

(1) Des Cloizeaux, Em. Bertrand, *Bull. soc. minér.*, 1878; 1881. — (2) Du latin *micare*, étinceler.

somme de l'oxygène des bases est égale à l'oxygène de la silice, ce qui conduirait à la formule générale $3RO,R^2O^3(SiO^2)^3$.

Les micas ont une densité comprise entre 2,78 et 3,1. Leur dureté moyenne est 2,5; ils se laissent couper au couteau. Dans le matras, tous dégagent une petite quantité d'eau, plus ou moins chargée d'acide fluorhydrique. Au chalumeau, les micas magnésiens sont peu fusibles; ils donnent avec les flux une forte réaction de fer. Les micas potassiques fondent plus ou moins facilement. Tous sont difficilement attaqués par l'acide chlorhydrique, mais l'acide sulfurique décompose complètement les micas magnésiens et laisse la silice sous formes d'écailles blanches nacrées.

En lumière parallèle, tous les micas, dans les plaques minces qui les rencontrent suivant le plan de la base, se comportent comme rigoureusement hexagonaux et s'éteignent aux nicols croisés; seulement dans les micas blancs, quand $2E = 70°$, on observe, en faisant tourner la plaque, des différences dans l'intensité de la teinte sombre, qui laisse apparaître des gris et des blancs du premier ordre.

Les micas noirs sont fortement polychroïques, généralement déchiquetés et souvent courbes. Les micas blancs, dans les roches, sont encore moins réguliers. Ils donnent de vives couleurs de polarisation, irisées, où dominent le jaune et le rouge. Tous les micas sont de signe optique négatif. Leur biréfringence est très élevée, variant de 0,04 à 0,05.

Les anciens minéralogistes avaient désigné sous le nom de *Biotite* (dédiée à Biot) l'ensemble des micas d'apparence hexagonale, uniaxes ou à deux axes très rapprochés; sous celui de *Phlogopite* (de φλογωπός, *ressemblant au feu*) les micas de forme prismatique, à axes peu écartés et d'apparence rhombique; tandis que le nom de *Muscovite* (ou *verre de Muscovie*) était réservé aux micas d'apparence monoclinique.

Tous les micas sont en réalité *monocliniques*; car la bissectrice aiguë n'y est jamais exactement perpendiculaire au plan de la base; seulement les deux axes cristallographiques situés dans g^1 sont presque rectangulaires, ce qui explique l'incertitude des déterminations antérieures, et l'angle plan de la base est presque toujours de 120°. On admet pour R. A. la valeur 0,577 : 1 : 3,274.

M. Tschermak s'est livré à une étude approfondie de la série des micas et, en faisant intervenir la considération de l'isomorphisme, il a été conduit à les répartir de la manière suivante (voir le tableau page 474) :

Le signe $+ f$ indique que l'angle des axes optiques augmente avec la teneur en fer, le signe $- f$ qu'il diminue dans les mêmes circonstances. Quant aux signes $\rho > v$ ou $\rho < v$, ils définissent, comme toujours, le sens de la dispersion optique.

Lorsqu'une lame de mica est frappée avec une pointe mousse, il s'y fait un système de fentes étoilées, dont la plus nette est dirigée suivant g^1, les deux autres suivant les traces de *m*. Cette *figure de percussion* permet d'orienter

une lame qui n'a pas de contours géométriques. La *figure de pression* en diffère en ce que les lignes d'étoilement deviennent *perpendiculaires* à m et à g^1, marquant des plans de glissement parallèles à $a^5/_2$ et à $(d^1/_2\ b^1/_4\ g^1/_5)$.

GENRES	PLAN A.O. NORMAL A g^1		AXES OPTIQUES DANS g^1			
Biotite. . .	Anomite $\rho > v$	$-f$	Méroxène $\rho < v$	$+f$	Lépidomélane	
Phlogopite. .			Phlogopite $\rho < v$	$+f$	Zinnwaldite $\rho > v$	$-f$
Muscovite . .	Lépidolite $\rho > v$ Muscovite $\rho > v$ Paragonite $\rho > v$	$-f$				

Pour M. Tschermak, trois sortes de silicates peuvent prendre part à la composition des micas : 1° des silicates alumineux et potassiques, de formules $K^6Al^6Si^6O^{24}$ et $K^6Al^4Si^6O^{24}$, dans lesquelles, à K^6, on peut substituer K^4H^2, K^2H^4, H^6, le symbole K pouvant d'ailleurs être partiellement remplacé par ceux des éléments isomorphes Na, Li; 2° un silicate magnésien, $Mg^{12}Si^6O^{24}$, où Mg peut céder la place à Fe ou à Mn; 3° un composé hydraté ou fluoré, $Si^{10}H^8O^{24}$ ou $Si^{10}O^8Fl^{24}$.

GENRE BIOTITE

Les micas du genre *Biotite* P. S. = 2,8 à 3,2. — D. = 2,5 à 3) sont constitués par l'union, en proportions définies (1 : 1 ; 2 : 1 ; etc.), du premier silicate alumineux avec le silicate magnésien. Ils contiennent peu de soude et presque pas de lithine. Ce sont les plus lourds de tous les micas et aussi les plus facilement décomposables par altération à l'air. C'est presque exclusivement à la Biotite qu'appartiennent les micas des roches éruptives modernes.

L'**Anomite** ou *Rhombenglimmer* est une espèce rare de mica vert magnésien, rencontrée d'abord dans un marbre du lac Baïkal, puis retrouvée dans des basaltes, des roches à néphéline, etc. L'angle 2E est de 12 à 16°. La composition comporte : 40 à 41. SiO^2; 16 à 17. Al^2O^3; 0,7 à 2. Fe^2O^3; 5 à 6. FeO; 21 à 24. MgO; 8,5 à 9. K^2O; 1,5. Na^2O; 1,3 à 2. H^2O; 0 à 1,5. Fl.

Le **Méroxène** ou mica vert du Vésuve et, avec lui, toutes les variétés ferromagnésiennes qui s'y rapportent, offrent les formes de la figure 408.

Les faces dominantes sont p, $b^1/_2$, $d^1/_2$, g^1, a^1 et $z = \{d^1/_2 b^1/_4 g^1\}$.

On a $mm = 119°59'12''$ et $pb^1 = 90°0'10''$.

Le méroxène est sujet à des macles par empilement qui ont été décrites par M. Tschermak.

L'angle 2E varie de 0° à 20°. La bissectrice aiguë n_p diffère très peu de la normale à p. Dans les plaques qui ne sont pas parallèles à la base, l'espèce offre un polychroïsme marqué, la teinte variant du jaunâtre ou du brun clair (pour la direction perpendiculaire au clivage) au brun foncé (suivant le clivage).

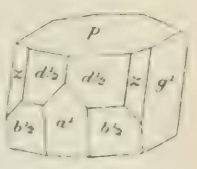


Fig. 408.

On a, pour n_g et n_m, 1,606 et, pour n_p, 1,562. La biréfringence des micas noirs varie de 0,03 à 0,06.

L'analyse donne 38 à 43. SiO^2; 11 à 20. Al^2O^3; 1 à 13. Fe^2O^3; 5 à 11. K^2O et surtout 10 à 30. MgO, avec un peu de soude et 0 à 4. H^2O.

Les micas noirs ferromagnésiens des granites, gneiss, micaschistes, syénites, minettes, trachytes, etc., appartiennent soit au Méroxène, soit au **Lépidomélane** (de λεπίς, écaille, et μέλας, noir), où l'aluminium peut être, pour une grande part, remplacé par du fer; de telle sorte que le mica, de couleur très foncée, devient attirable à l'électro-aimant. (P. S. = 3. — D. = 3). Cette dernière espèce comprend les micas noirs des roches volcaniques. L'angle 2V est à peu près nul dans la plupart des biotites des granites et des gneiss.

Dans les plaques minces, les micas ferro-magnésiens conservent toujours une teinte brune ou verdâtre, d'autant plus facile à distinguer que tous les minéraux qui les entourent sont en général devenus incolores. Les paillettes sont habituellement déchiquetées, parfois déformées et le clivage s'y traduit par un grand nombre de stries fines (fig. 409, 410). Le polychroïsme est intense dans les variétés colorées, le minimum d'absorption ayant lieu suivant n_p.

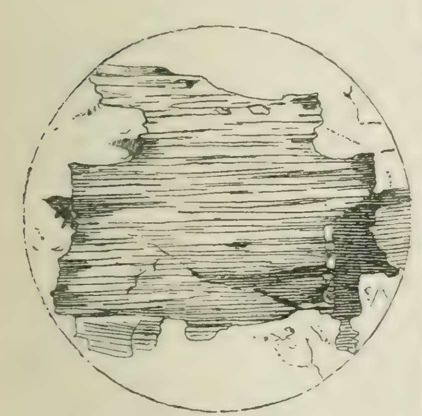

Fig. 409. — Biotite de granite, laissant voir le clivage basique. Grossissement : 30 diamètres. — D'après M. Rosenbusch.



Fig. 410. — Biotite *b* et Muscovite *m* dans un gneiss granulitique. Grossissement : 30 diamètres. — D'après MM. Fouqué et Michel-Lévy.

GENRE PHLOGOPITE

Les micas phlogopites, dont il existe des passages au genre précédent, ont une densité de 2,75 à 2,97, une dureté de 2,5 à 3 et renferment à la fois les

trois espèces de silicates. L'analyse y montre : 41 à 44. SiO^2; 13 à 15. Al^2O^3; 1 à 2. FeO ; 27 à 29. MgO ; 8 à 10. K^2O ; 1 à 2. Na^2O ; 0,5 à 3. H^2O ; 1 à 4. Fl. Ce sont donc des micas magnésiens presque dépourvus de fer et plus riches en alcalis que les biotites.

Les variétés vertes sont plus fluorées que les variétés d'un rouge brun. Ce sous-genre paraît particulier aux calcaires cipolins et aux serpentines. Les échantillons sont complètement décomposables par l'acide sulfurique, avec abandon d'écailles siliceuses.

Dans la **Phlogopite** proprement dite, on a $2E = 0°$ à $17°25'$ pour les rayons rouges et la bissectrice aiguë fait un angle de $2^1/_2$ degrés avec la normale à *p*.

La **Zinnwaldite** ou *Lithionite* est une variété lithinifère et fluorifère de mica ferreux, où 2E varie de 10° à 65°, la dispersion des axes et des bissectrices étant presque nulle. On y trouve 46. SiO^2; 22,5. Al^2O^3; 0,66. Fe^2O^3; 8 à 15. FeO ; 1,75. MnO ; 10,46. K^2O ; 0,42. Na^2O ; 1,5 à 5. Li^2O ; 1. H^2O ; 4 à 8. Fl, avec traces d'acide phosphorique, de cæsium, de rubidium et de thallium.

Le poids spécifique peut s'élever jusqu'à 3,2. La couleur de la Lithionite varie du brun foncé au blond clair. Dans ce dernier cas, la bissectrice diffère assez sensiblement de la normale à *p*. Réact. 1. L'espèce est très répandue dans les granites à étain, avec inclusions de rutile et de cassitérite.

La *Vermiculite* de l'Amérique du Nord est une phlogopite altérée (D. = 1) à éclat nacré, qui, sous le feu du chalumeau, se gonfle en un cylindre dont la longueur est presque le centuple de celle de l'échantillon à froid. Le ***Rabenglimmer*** ou mica gris foncé d'Altenberg est une Zinnwaldite ferreuse, où 2E est petit.

GENRE MUSCOVITE

Ce genre comprend les micas peu ou pas magnésiens, mais riches en potasse, en alumine et en eau ; ils sont toujours de couleur claire et très élastiques. M. Tschermak y distingue :

Lépidolite (c'est-à-dire pierre en écailles) ou mica lithinifère, combinaison du premier silicate alcalin avec $Si^{10}O^8Fl^{24}$. On y trouve 50 %. SiO^2; 28. Al^2O^3; 11 à 12. K^2O ; 5 à 6. Li^2O ; 1 à 2. H^2O ; 5 à 8. Fl ; des traces d'acide phosphorique et pas de fer ni de soude. La couleur du Lépidolite est rose lilas ou blanc d'argent. L'angle apparent des axes est de 50° à 77°. L'espèce se présente en lamelles qui fondent facilement au chalumeau. — Réact. 1. — Réduit en poudre, après fusion, Réact. 88. — P.S. = 2,84 à 2,89. — D. = 2,5 à 4.

Muscovite proprement dit ou *verre de Muscovie*. $K^2H^4Al^6Si^6O^{24}$.

P. S. = 2,76 à 3,1. — D. = 2 à 3. — R. A. = 0,578 : 1 : 3,293 ; $ph^1 = 90°4'$.
Les cristaux de muscovite offrent souvent la combinaison de la figure 411.
Les formes habituelles sont *p*, *m*, $b^1/_2$, $d^1/_4$, g^1, $e^1/_2$ ou $e^3/_2$, g^2 et $x = d^1/_2\, b^1/_4\, g^1$.

On a $mm = 120°$; $d^1/_4 \, d^1/_4 = 120°11'$ ant. : $pd^1/_4 = 84°24'$ post.; $pb^1/_2 = 88°30'$ post. Au clivage p s'ajoute un clivage imparfait suivant les faces m. Les macles sont nombreuses et réunissent souvent, soit par leurs faces m, soit par une face m et une face g^1, deux cristaux dont les faces p demeurent parallèles. Très souvent il y a empilage de paillettes avec rotation de 120° autour de l'axe pseudo-ternaire.

Opt. 2E varie de 40° à 70°; 2V de 30° à 50°. $n_g = 1,613$; $n_m = 1,610$; $n_p = 1,571$. La biréfringence oscille entre 0,035 et 0,042. Bissectrice n_p peu éloignée de la normale à p (à 2° près).

Dans la variété *Phengite*, il y a union du silicate $K^2H^4Al^6Si^6O^{24}$ avec $Si^{10}H^8O^{24}$, dans la proportion 3 : 1.

L'analyse donne : 45,5. SiO^2; 36,5. Al^2O^3; 1. Fe^2O^3; 1. FeO; 0,5. MgO; 0,3. CaO; 9. K^2O; 0,7. Na^2O; 5. H^2O; 0,13. Fl. Ainsi les micas dits potassiques ne contiennent guère que 1 à 2 % de potasse de plus que les autres; ce qui les distingue surtout, c'est l'absence presque complète de la magnésie, jointe à une teneur en silice et surtout en alumine plus élevée que celle des micas magnésiens.

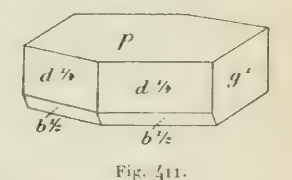


Fig. 411.

La couleur dominante de la muscovite est le blanc. C'est dans cette espèce (absente des roches volcaniques) que se rangent les *micas argentins* des granulites et des pegmatites, souvent en larges tables empilées ou même en filaments groupés (*mica palmé*), ou encore en calottes emboîtées (*muscovite testacée*). Mais la teinte de la muscovite (qui d'ailleurs n'est pas la même par transmission que par réflexion) peut aussi être le gris, le brun, le vert pâle, le violet ou le jaune. Les plus larges plaques de cette espèce viennent de la Sibérie, du Brésil, du Canada et des Indes orientales. On les utilise en guise de vitres et aussi de fermetures transparentes pour les foyers de chauffage.

Incolore dans les lames minces, la muscovite s'y fait remarquer par ses teintes de polarisation, vives et irisées.

A la Muscovite appartiennent la **Damourite** (dédiée à M. Damour), mica hydraté blanchâtre, à 11 % de potasse, en écailles microscopiques, onctueuses au toucher, tandis que la muscovite est souvent âpre; la **Paragonite** (de παράγω, *je trompe*), mica sodique blanc jaunâtre, à éclat soyeux (2E = 70°), servant de gangue au disthène et à la staurotide du Saint-Gothard et dont la formule est $H^4Na^2Al^6Si^6O^{24}$; l'**Œllachérite**, sorte de muscovite barytifère; la **Margarodite** ou *talc endurci* des schistes chloriteux du Tyrol. La **Séricite** (P. S. = 2,809), si abondante au milieu des schistes métamorphiques du Taunus et des Ardennes, où elle se fait remarquer par l'éclat *soyeux* qui lui a valu son nom, son apparence de fibres entrelacées et sa couleur variant du vert au jaunâtre, est aussi une muscovite hydratée. On l'a souvent confondue avec le talc,

dont elle a le toucher onctueux, mais dont elle se distingue par sa teneur en potasse (11,67 %). Dans les roches, les paillettes de séricite, très minces, sont à la fois allongées et tordues.

La *Gilbertite*, d'un blanc jaunâtre, est une variété de Muscovite.

La *Fuchsite*, en paillettes d'un vert foncé très franc, et le *Chromocre*, longtemps considéré comme de l'oxyde de chrome, mais en réalité silicaté et potassique, sont des muscovites chromifères.

DEUXIÈME CLASSE

SILICATES ACCESSOIRES DES ROCHES ACIDES

Nous rangeons sous ce titre un certain nombre de silicates, dont la plupart offrent ce caractère, de présenter dans leur composition des substances connues par leur énergie chimique, telles que le fluor et l'acide borique ; de telle sorte qu'on peut considérer ces minéraux comme les *témoins* des phénomènes de dissolution, au milieu desquels les roches acides ont pris naissance.

On peut diviser les silicates accessoires en trois catégories, suivant qu'ils se rencontrent : 1° dans les *granites*, les *gneiss* et les roches associées ; 2° dans les *pegmatites*, où la cristallisation semble s'être exercée avec le plus de puissance ; 3° enfin dans les *syénites éléolitiques* ou *zirconiennes*, depuis longtemps connues par le grand nombre des substances rares qu'elles renferment.

PREMIÈRE FAMILLE. — SILICATES ACCESSOIRES DES GRANITES ET GNEISS

Cordiérite. $Mg^3(Al^2Fe^2)^3Si^8O^{28}$ ou $Mg^2(Al^2Fe^2)^2Si^5O^{18}$. — P. S. = 2,59 à 2,66. — D. = 7 à 7,5. — 42 à 50. SiO^2 ; 30 à 37. Al^2O^3 ; 1 à 11. Fe^2O^3, 6 à 13. MgO ; quelquefois de la chaux et de l'oxyde manganeux.

S. rhombique. R. A. = 0,587 : 1 : 0,559 ; $mm = 119°10'$; $pb^1/_2 = 132°12'$; $pe^1 = 150°49'$. Combinaisons habituelles : mg^1p ; $mg^1e^1b^1$; $mh^1g^2g^1p$; $mh^1g^2g^1pb^1/_2$ (fig. 412) ; $pmg^1e^1b^1/_2$, etc. Cristaux ordinairement prismatiques. Clivages : g^1 assez net ; h^1 imparfait.

Opt. Signe négatif. n_g varie de 1,539 à 1,551 ; n_m de 1,536 à 1,549 ; n_p de 1,532 à 1,543 ; A. O. dans h^1 ; 2V = 40 à 84° pour l'orangé ; 2E = 64° à 149° ; $\rho > v$. Biss. normale à p. Polychroïsme marqué (d'où le nom de *Dichroïte*). Quelques variétés, à la lumière naturelle, paraissent d'un bleu foncé perpendiculairement à p, d'un blanc grisâtre perpendiculairement à h^1 ; d'un blanc jaunâtre normalement à g^1 (1). Ce polychroïsme est très atténué dans les plaques minces.

(1) V. plus haut, p. 289.

Cassure conchoïdale; éclat vitreux. Difficilement fusible sur les bords; difficilement attaquable.

La variété bleue, dite *Saphir d'eau*, se trouve dans des alluvions à Ceylan. La variété la plus commune, d'un bleu foncé, dite *Peliom* ou *Iolite* (de ἴον, violet), se rencontre dans le granite de Bavière, avec pyrrhotine, blende et pyrite. La *Fahlunite dure* du gneiss scandinave, de couleur brune, est aussi de la Cordiérite.

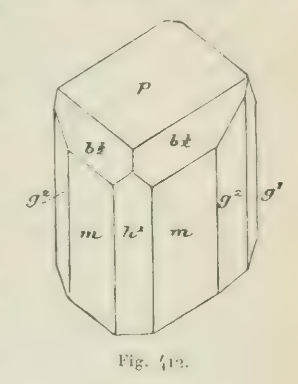


Fig. 412.

La Cordiérite offre des inclusions caractéristiques de sillimanite en aiguilles entrelacées, ainsi que des cassures étoilées et sinueuses, remplies d'une matière jaune isotrope. Dans les roches, ses sections sont rectangulaires, hexagonales ou ovales.

Très facile à confondre avec le quartz en raison de son poids spécifique, de son indice et de sa biréfringence, la Cordiérite se distingue de ce minéral par l'action de l'acide hydrofluosilicique, qui fait naître de petits cristaux de fluosilicate de magnésie, aux sections le plus souvent en forme d'hexagones allongés.

Étym. : Dédiée à Cordier.

On rapporte à la Cordiérite, à titre de produits d'altération, une série de minéraux offrant toutes les transitions possibles entre l'état de cristaux transparents et l'état amorphe ou pseudomorphique, avec abondance de micas blancs. De ce nombre sont la *Polychroïte*, l'*Aspasiolite*, l'*Esmarkite d'Erdmann*, la *Praséolite* en prismes à six, huit et douze pans (dans ce cas, $mh^1g^2g^1p$), toutes à éclat vitreux et contenant de 4 à 10 °/₀ d'eau (P. S. = 2,7. — D. = 3 à 3,5).

La **Pinite**, au contraire, est amorphe et opaque, bien que ses formes extérieures soient très nettes, offrant les combinaisons mh^1g^1p; $mh^1g^2g^1p$, etc. La dureté n'est plus que de 2 à 3; la densité est de 2,7 à 2,9. On compte de 1 à 8 °/₀ d'eau avec 45 à 50. SiO^2. Les cristaux, gris ou bruns, parfois pénétrés ou entourés par des lamelles de mica biaxe, se présentent dans les granites ou les porphyres quartzifères, rarement dans les gneiss et les micaschistes.

D'après M. Tschermak, la masse des cristaux de pinite serait surtout formée de muscovite et de biotite. Ces deux minéraux paraissent être les derniers termes de l'altération de la cordiérite.

La **Gigantolite**, en prismes rhombiques à douze faces, gris ou bruns, du granite gneissique de Finlande, et la **Fahlunite** du schiste talqueux de Fahlun, en prismes imparfaits, d'un noir verdâtre, inattaquables aux acides, avec 45 °/₀. SiO^2 et 9 à 12. H^2O, appartiennent au même groupe, qui comprend encore la *Weissite*, la *Pyrargillite*, etc.

Sphène, $CaTiSiO^5$. — P. S. = 3,3 à 3,7. — D. = 5 à 5,5. — 30 à 32. SiO^2 : 38 à 43. TiO^2 ; 22 à 27. CaO, avec petites quantités de Fe^2O^3 et de MnO.

S. monoclinique. R. A. = 0,755 : 1 : 0,854. mm = 113°31′ ; ph^1 = 119°43′ ; $d^1/_2 d^1/_2$ = 136°12′ ; $h^1 d^1/_2$ = 144°56′ ; $pd^1/_2$ = 141°44′ ; po^2 = 159° (1).

Les combinaisons cristallines sont nombreuses et variées ; les principales sont $mpo^2 h^1 d^1/_2$ (fig. 413), donnant aux cristaux bruns, engagés dans la roche, l'aspect d'un toit de maison ; $h^1 po^2 e^1/_2$, cristaux très aplatis, généralement pénétrés de ripidolite, du Valais et du Tyrol. Macles fréquentes, parallèlement à h^1, avec gouttière (Oisans), ou en forme de double coin très pointu, offrant les faces h^1, o^2 et p (fig. 414).

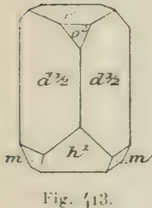


Fig. 413.

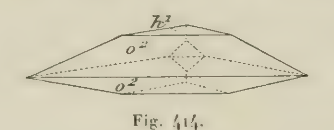


Fig. 414.

Clivages : m assez net ; h^1 et b^1 moins nets ; $d^1/_2$ facile dans la Greenovite.

Le sphène est incomplètement attaquable par les acides.

Opt. Biréfringence énergique, de signe positif, n_g = 2,0093 ; n_m = 1,8940 ; n_p = 1,8879. A. O. dans g^1 ; 2E = 53 à 56° (rouge) ; 2V = 23° à 34°. Dispersion inclinée ; $\rho > v$. Biss. presque normale à o^2. Les plaques parallèles à o^2 donnent une très belle image d'interférence, avec hyperboles colorées intérieurement de rouge vif. Polychroïsme plus ou moins marqué. Anomalies optiques qui semblent indiquer un réseau triclinique.

Éclat adamantin ; couleurs variables ; jaune, jaune verdâtre (*Sphène* proprement dit), vert clair, brun (*Titanite*, où le fer remplace en partie le calcium), rouge.

Ch. Fond sur les bords, avec bouillonnement, en verre coloré ; les cristaux jaunes deviennent bruns. Perle jaune transparente au borax ; au sel de phosphore, avec addition d'étain, perle violette ; complètement décomposé par les acides sulfurique et fluorhydrique.

Le sphène en cristaux bruns est engagé dans beaucoup de roches, granites, gneiss, syénites, etc. Il offre dans les plaques minces, entre les nicols croisés, des colorations d'un jaune brunâtre.

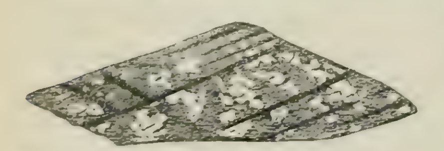


Fig. 415. — Sphène de Syénite. Grossissement : 75 diamètres. — D'après M. Rosenbusch.

Le *Spinthère* est un sphène verdâtre, engagé dans le calcaire et offrant la combinaison $po^2 d^1/_2 h^1$ avec $\{d^1/_5 b^1/_{12} g^1/_7\}$; la *Séméline*, du lac de Laach, offre $mh^1 pd^1/_2$, tandis que $me^1/_2 b^1$ se trouve dans la *Pictite* de la protogine à Chamonix, et $o^1/_2 d^1/_2 d^1/_4 b^1/_2$ dans la *Greenovite* rouge de chair ou sphène manganésifère de Saint-Marcel. La *Ligurite* est un sphène en grands cristaux aplatis,

(1) MM. G. Rose et Zirkel adoptent pour R. A. la valeur 0,755 : 1 : 0,657. Dans ce cas, notre h^1 devient p, m se change en e^1, et $d^1/_2$ en $\{ b^1 d^1/_3 g^1/_3 \}$.

d'un vert jaunâtre ou rougeâtre, engagés, avec apatite incolore, dans un schiste talqueux d'Ala (Piémont).

La *Keilhauite* ou *Yttrotitanite* de Norvège est un sphène riche en yttria et possédant les formes ainsi que les propriétés optiques du sphène normal.

En lames minces, le sphène, caractérisé par son relief considérable, offre très souvent une section en forme de losange aigu (fig. 415) et sa surface est guillochée en lumière parallèle, la plus minime variation d'épaisseur produisant de notables changements dans la couleur. Avec une plaque de $0^{mm},01$, le sphène polarise déjà dans le violet du troisième ordre.

Étym. : De σφήν, coin, à cause de la forme de certains cristaux.

DEUXIÈME FAMILLE. — SILICATES ACCESSOIRES DES PEGMATITES

Tourmaline. — Sous la dénomination de tourmaline viennent se ranger des minéraux d'aspect très varié, qui tous sont des *borosilicates d'alumine*, généralement fluorifères, et offrent des formes dérivées, au moins en apparence, de la symétrie ternaire, avec tendance à l'hémimorphisme. Mais, d'une part, le fer, le manganèse, la magnésie, les alcalis y interviennent en proportions variables et, d'autre part, le rapport d'oxygène, pour les bases protoxydes, les sesquioxydes, la silice et l'acide borique, est très loin d'être constant.

Ainsi le nom de tourmaline mériterait de désigner un genre plutôt qu'une espèce. Cependant il y a quelques caractères généraux, applicables à tous les types, et qu'il convient d'indiquer d'abord. Le premier est le mode de cristallisation, dérivé du système rhomboédrique, avec $pp = 133°8'$ (1) et R. A. = 1 : 0,4474.

Les formes les plus fréquentes sont a^1, b^1, p, e^1, d^1, e^2, auxquelles s'associent parfois $e^3/_2$, d^2, $d^3/_2$ et des prismes dodécagonaux, tels que $\{b^1/_3 d^1 d^1/_2\}$, enfin des scalénoèdres comme $d^1/_4\ d^1 b^1/_3$.

Le polyèdre particulaire de la tourmaline est hémiaxe dichosymétrique. Aussi le prisme e^2 est-il réduit à trois faces, tandis que d^1 en conserve six et que les prismes dodécagonaux deviennent hexagonaux. De plus, la nature du polyèdre entraîne l'hémimorphisme : c'est pourquoi les cristaux de tourmaline ne sont pas terminés de même aux deux extrémités. Ainsi l'un des pointements portant les faces b^1 et a^1, l'autre en est dépourvu, mais possède en revanche les faces e^1; en outre, s'il arrive (ce qui est fréquent) que tous deux soient munis des faces p, celles du pointement privé de b^1 portent des stries, parallèles à pe^1, qui font défaut à l'autre, ce qui prouve, en conformité de la théorie, que les deux systèmes de faces p, du haut et du bas, ne doivent pas appartenir au même *moment* de la cristallisation.

(1) Ce chiffre est celui qui résulte de l'adoption du paramètre 0.4474. Les mesures prises varient, d'après Breithaupt, entre 132° et 134°.

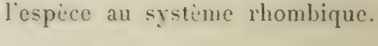
D'après cela, les combinaisons habituelles sont :

d^1 $(\frac{1}{2}a^1)$ $(\frac{1}{2}p)$ $(\frac{1}{2}b^1)$ $(\frac{1}{2}e^1)$; d^1 $(\frac{1}{2}e^2)$ $(\frac{1}{2}e^1)$ $(\frac{1}{2}p)$ (fig. 416); d^1 $(\frac{1}{2}e^2)$ $(\frac{1}{2}p)$ $(\frac{1}{2}b^1)$ $(\frac{1}{2}a^1)$ (fig. 417); d^1 $(\frac{1}{2}p)$ $(\frac{1}{2}e^1)$ $(\frac{1}{2}a^1)$; d^1 $(\frac{1}{2}e^2)$ $(\frac{1}{2}a^1)$ $(\frac{1}{2}p)$ $(\frac{1}{2}d^2)$, sur des cristaux rouges de l'île d'Elbe, etc.

Le développement prépondérant des trois faces de e^2 donne souvent aux cristaux une section triangulaire, et s'il arrive qu'au demi-prisme e^2 et au prisme d^1 se joigne le demi-prisme dodécagone $x = \frac{1}{2} \{b^1/_3\ d^1\ d^1/_2\}$, la section prend une forme voisine d'un triangle sphérique (fig. 418).

Principaux angles ; $e^2 d^1 = 150°$; $a^1p = 152°40'$; $a^1 b^1 = 165°31'$; $a^1 e^1 = 134°3'$; $pb^1 = 156°34'$; $b^1 b^1 = 155°$; $e^1 e^1 = 103°3'$; $pd^1 = 113°26'$.

Ajoutons que, d'après Mallard, la symétrie ternaire de la tourmalime ne serait qu'approchée. Les lames parallèles à a^1 donnent, en lumière polarisée, des apparences qui doivent faire rapporter


l'espèce au système rhombique.

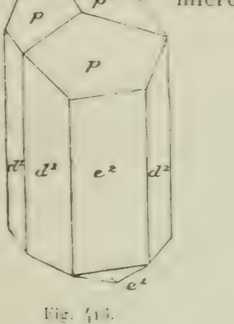


Fig. 416.

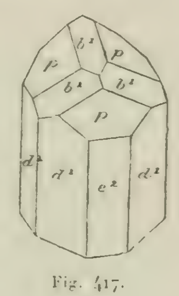


Fig. 417.

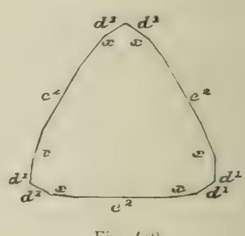


Fig. 418.

La tourmaline n'a que des clivages imparfaits suivant p et d^1.

Elle est optiquement négative, avec $n_g = 1{,}637$ (raie D), $n_p = 1{,}6197$, pour les variétés incolores et $n_g = 1{,}643$, même $1{,}649$; $n_p = 1{,}623$, pour les variétés vertes ou brunes. Son polychroïsme est remarquable. On l'observe à son maximum en plaçant l'allongement des cristaux normal à la plus courte diagonale du polariseur. En lames minces, les couleurs les plus habituelles de la tourmaline sont le brun violacé, le bleu et le noir. On trouve fréquemment une structure zonée avec colorations variables (ainsi à Madagascar).

En raison de son hémimorphisme, la tourmaline est nettement pyroélectrique. Pendant le refroidissement, le sommet où domine e^1 prend l'électricité positive et est dit pôle *antilogue*, tandis que le pointement b^1 ou *analogue* prend l'électricité négative. Généralement, le pôle antilogue se trouve du côté où les arêtes culminantes du rhomboèdre p viennent correspondre aux faces conservées de e^2. Ainsi, dans les figures 416 et 417, le pointement supérieur serait analogue.

Le poids spécifique des tourmalines varie entre 2,94 et 3,24 ; leur dureté entre 7 et 7,5. La cassure est conchoïdale ou inégale.

Fondues avec spath fluor et bisulfate de potasse, toutes les tourmalines colorent la flamme en vert ; calcinées au rouge vif, toutes dégagent du fluorure de silicium et deviennent attaquables par l'acide fluorhydrique.

Etym : De Turamali, dans l'île de Ceylan. Le nom de tourmaline, introduit en 1703, a été lent à se répandre dans la science, où l'espèce a été longtemps connue sous le nom de *Schorl* ou *Schörl*.

MM. Riggs (1) et Jannasch (2) s'accordent à considérer les tourmalines comme oscillant autour de trois types, les tourmalines *lithinifères*, exemptes de magnésie ; les tourmalines *magnésiennes*, exemptes de lithine et, entre les deux, les tourmalines *ferrifères*.

Pour M. Riggs, toutes les tourmalines renferment 12. SiO^2, 3. B^2O^3 et 4. H^2O tandis que, pour M. Jannasch, le terme constant serait 24. SiO^2 ; 6. B^2O^3 ; 7. H^2O (3). A cette partie commune s'ajouteraient :

GENRE	RIGGS	JANNASCH
Tourmalines lithinifères.	$8.Al^2O^3.\ 2.(Na,Li)^2O$	$15.Al^2O^3.\ 4FeO.4(Li,Na)^2O$
— ferrifères.	$7.Al^2O^3.\ 4.(FeO)Na^2O$	$14.Al^2O^3.\ 9.FeO.\ 2.Na^2O.$
— magnésiennes . . .	$5.Al^2O^3.\ \frac{28}{3}.MgO.\frac{2}{3}Na^2O$	$13.Al^2O^3.\ 12.MgO.\ 2Na^2O$

La composition moyenne des premières comporte : 37,70. SiO^2 ; 10. B^2O^3 ; 40,60. Al^2O^3 ; 3,21. Na^2O ; 1,57. Li^2O ; 3,77. H^2O. Celle des secondes : 34,89. SiO^2 ; 10,18. B^2O^3 ; 34,59. Al^2O^3 ; 13.95.FeO ; 2,90. Li^2O ; 3,49. H^2O ; celle des troisièmes : 37,38. SiO^2 ; 10. B^2O^3 ; 26,49. Al^2O^3 ; 19,31. MgO ; 2,18. Na^2O ; 3,74. H^2O.

La proportion du fluor varie, dans les tourmalines, entre 0 et 0,78 %.

Les variétés magnésiennes sont *brunes* ou *jaunes*, avec P. S. = 3,0 à 3,07. Au chalumeau, elles gonflent beaucoup et fondent en une scorie grise ou jaunâtre. On les trouve dans la pegmatite, le micaschiste, quelquefois la dolomie. En Carinthie, notamment dans le bassin de la Drave, la tourmaline brune (*Dravite*) est en cristaux prismatiques bien formés, dans une gangue de Margarodite.

Les variétés ferro-magnésiennes sont *brun foncé* ou noires, avec P. S. = 3,02 à 3,05. Elles gonflent au chalumeau et fondent en scorie de couleur variable.

Les variétés ferrières sont *noires* et constituent le *Schorl* ou *Schörl* proprement dit, généralement remarquable par son éclat vitreux et sa tendance à former des masses bacillaires (*Stangenschorl*). Les cristaux sont presque toujours striés parallèlement aux arêtes du prisme. La densité s'élève à 3,15 et même 3,25, et le minéral fond au chalumeau en scorie brune ou noire.

La tourmaline noire abonde dans les pegmatites et les granulites, dont elle est, on peut le dire, l'élément caractéristique. Les cristaux sont souvent implantés, en prismes ou en aiguilles, dans de grosses parties de quartz

(1) *Americ. Journal* [3], XXXV, p. 35. — (2) *In* Lacroix, *Mineralogie de la France*. — (3) M. Clarke a proposé, pour l'acide d'où dériveraient toutes les tourmalines, la formule $H^{20}B^3Si^6O^{31}$, où la moitié de H pourrait être remplacée par Al. M. Penfield admet $H^{20}B^2Si^4O^{21}$, qui donne, pour les rapports SiO^2 : B^2O^3 : H^2O, les valeurs 4 : 1 : 20.

hyalin, de manière à constituer une roche spéciale, appelée hyalotourmalite. Quelquefois la longueur des cristaux de tourmaline dépasse $0^m,30$.

Les variétés lithinifères sont généralement manganésiennes. Elles peuvent aussi être ferrifères. On compte de 0,32 à 2,22 °/₀ de MnO et de 0,26 à 7,07 de FeO. En général, quand les proportions des deux oxydes sont égales, les tourmalines sont ou *incolores* (*Achroïte*) ou faiblement colorées en rose ou en vert pâle. Un excès de manganèse donne les variétés *rouges*, *Rubellite*, *Sibérite*, *Apyrite*, qu'on trouve dans les pegmatites, en Sibérie comme à l'île d'Elbe. Un excès de fer fait naître les variétés *bleues* (*Indicolite* de Suède et de l'Oural) ou *vertes*. Ces dernières, qui se trouvent dans les pegmatites et quelquefois dans la dolomie (une variété d'un vert émeraude se rencontre dans le marbre à Saint-Béat), offrent des phémonènes d'absorption décrits dans la partie théorique de cet ouvrage.

Les tourmalines où le manganèse domine (P. S. = 3 à 3,1) s'exfolient au chalumeau, et deviennent blanches, sans entrer sensiblement en fusion. Les variétés ferro-manganésiennes (P. S. = 2,94 à 3,11) fondent difficilement, avec faible gonflement, en scorie ou en émail. Quant aux tourmalines purement lithinifères, elles sont infusibles.

L'hémimorphisme de la tourmaline s'accuse souvent, sur les variétés manganésiennes de l'île d'Elbe, par la différence de coloration des sommets d'un même prisme hexagonal d^1, l'un de ces sommets étant rose, tandis que l'autre est vert ou incolore. Aux États-Unis, dans l'Oural et à Madagascar, certains cristaux ont un noyau rosé, qu'entoure une enveloppe verdâtre, ou inversement.

Dans les plaques minces, la tourmaline offre un polychroïsme très marqué, comparable à celui du mica noir. Elle est pauvre en inclusions.

Axinite. $H^2(Ca, Fe, Mn, Mg)^6 B^2 Al^4 Si^8 O^{32}$. — P.S. = 3,29 à 3,3. — D. = 6,5 à 7.

Analyse de l'axinite de l'Oisans : 43,46. SiO^2; 5,61. B^2O^3; 16,33. Al^2O^3; 2,80. FeO; 6,78. Fe^2O^2; 2,62. MnO; 20,19. CaO; 1,73. MgO; 0,11. K^2O; 1,45. H^2O.

S triclinique; R. A. = 0,602 : 1 : 0,827. Angles des trois arêtes du noyau parallélépipédique : $yz = 121°32'$: $xz = 44°42'$; $xy = 140°20'$. Principaux angles : $mt = 135°26$; pm ant. = 134°48′ (1); tp ant. = 115°340′; ph^1 antérieur = 124°33′; pg^1 sur $i^1 = 93°10'$; $pf^1 = 143°30$; $mh^1 = 151°1$; pm post. = 45°12′; i^1p adj. = 139°6′.

Combinaisons habituelles : $m\,t\,p\,i^1$; $m\,t\,p\,i^1\,h^1\,f^1$ (fig. 419); $m\,h^1\,p\,i^1\,f^1$.

La face p est cannelée parallèlement à $p\,m$ et parfois à $p\,f^1$; les faces m, t et h^1 sont striées parallèlement à $m\,t$. Enfin m a souvent des stries suivant $m\,i^1$.

Clivage brillant suivant c^1, g^1 et ${}^2g$; interrompu suivant p.

(1) M. Zirkel, conservant les mêmes faces m et t que Des Cloizeaux, donne à p la notation $c^{1/2}$ et à f^1 la notation $o^{1/2}$.

Cassure inégale; transparente ou translucide; brune, parfois rougeâtre. Éclat vitreux.

Opt. Biréfringence énergique, négative. A. O. dans un plan normal à i^1, incliné de 40° sur $m\, i^1$ et de 24°40′ sur $p\, i^1$.

Biss. sensiblement normale à i^1. $2V = 71°$ à $74°$; $2E = 158°$ à $165°$. $n_g = 1,6810$ à $1,6954$; $n_m = 1,6779$ à $1,6918$; $n_p = 1,6720$ à $1,6850$. — Polychroïsme prononcé, passant du jaune olive (n_g) par le violet intense (n_m) au brun (n_p).

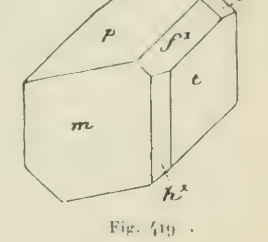


Fig. 419.

Ch : Gonfle et fond aisément en perle noirâtre. Réact. 16; avec le borax, au feu oxydant, Réact. 47; au feu de réduction, Réact. 48; inattaquable; après fusion, Réact. 88.

Étym. : ἀξίνη, *hache*, à cause de la forme tranchante des cristaux.

Associée au grenat et à la tourmaline, l'axinite forme une roche particulière en Cornouailles; on la trouve aussi dans l'Oisans, avec quartz chloriteux, dans les Pyrénées (en filons et amas dus au métamorphisme granitique dans le calcaire), la Saxe, la Norvège, etc.

Un autre silicoborate est la **Danburite**. $CaB^2Si^2O^8$ de Danbury (Connecticut), de Russell (New-York) et des Grisons. P. S. = 2,98 à 3,02. — D. = 7 à 7,5.

Ce minéral, complètement isomorphe avec la topaze, est rhombique avec R. A. = 0,544 : 1 : 0,481. $mm = 122°52'$; $e^1/_2 e^1/_2 = 85°8'$ sur p, $a^1 a^1 = 97°7$. Clivage p imparfait. Jaune pâle; éclat vitreux, fusible au chalumeau.

Opt. La Danburite, où les axes optiques sont situés dans p, offre cette particularité, jusqu'à présent unique parmi les cristaux rhombiques, que la bissectrice aiguë pour le rouge est perpendiculaire à la bissectrice aiguë relative au bleu. L'espèce est négative pour le rouge et positive pour le bleu. Le fait s'explique sans peine, si l'on considère que l'angle des axes de la Danburite est voisin de 90°; de telle sorte que les couleurs pour lesquelles cet angle devient obtus ont nécessairement pour bissectrice aiguë la bissectrice obtuse des radiations pour lesquelles l'angle était inférieur à 90°. On a $2V = 87°37'$ (rouge) et $89°4'$ (bleu). La bissectrice aiguë, du rouge jusqu'au vert, est la normale à g^1; celle du bleu est la normale à h^1. Grande dispersion des axes; $\rho < v$ autour de n_p. $n_g = 1,6331$; $n_m = 1,6303$; $n_p = 1,6258$.

La Danburite accompagne l'orthose et l'oligloclase dans une dolomie.

Topaze. $Al^{12}Si^6O^{25}Fl^{10}$. = P. S. = 3,4 à 3,6. — D. = 8. — 22 à 25. SiO^2; 54 à 58. Al^2O^3; 5 à 6,5. Si; 14 à 17, 8. Fl.

S. rhombique (1). R. A. = 0,529 : 1 : 0,954 (2). $mm = 124°17'$; $pe^1 = 136°21'$;

(1) Du moins en apparence; car les propriétés optiques conduisent à une symétrie monoclinique. — (2) M. Zirkel admet 0,477 pour le paramètre de l'axe vertical, ce qui transforme c^1 en $c^1/_2$.

$e^1\ e^1 = 92°42'$ sur p ; $g^3\ g^3 = 93°10'$ sur g^1 ; $m\ b^1 = 135°35'$; $b^1\ b^1 = 141°0'$.

Combinaisons habituelles : $m\ g^3\ b^1$ (fig. 420) ; $mg^2\ b^1\ e^1$ (fig. 421) ; $m\ p\ e^1$; $m\ g^3\ g^3\ g^1\ b^1$: $p\ m\ g^3\ b^1/_2\ b^1\ b^3/_3 e^1\ x$ (fig. 422) avec $x = e_{\frac{1}{3}} = (b^1\ b^1/_3\ g^1/_3)$, ce qui représente une brachypyramide appartenant aux zones $e^1\ b^1$ et $g^3 p$, etc.

Le polyèdre particulaire est hémiaxe, ce qui entraîne l'hémimorphisme. Presque tous les cristaux du Brésil ont la forme de la figure 420. En général, les faces m et g^3 sont striées parallèlement à leur intersection mutuelle.

Clivage parfait suivant p. La coexistence de ce clivage avec les faces g^3, souvent plus développées que m et faisant entre elles un angle presque droit,

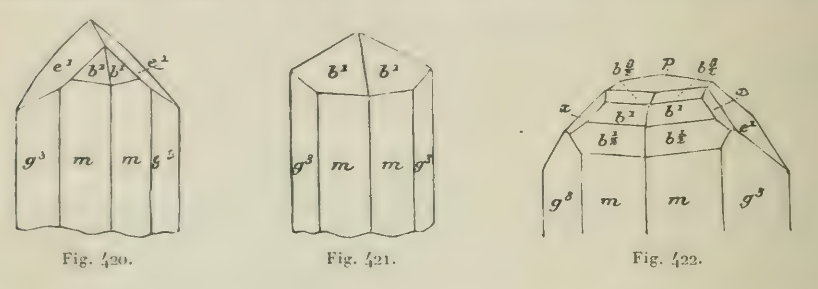


Fig. 420. Fig. 421. Fig. 422.

donne à certains cristaux de Sibérie, de couleur bleu verdâtre (*aigue-marine orientale*), l'apparence d'une symétrie quadratique. Clivages difficiles suivant a^1 et e^1.

Opt. Signe positif. A. O. dans g^1 ; $\rho > v$. $2V = 65°14'$; $2E$ varie de $71°32'$ à $129°30'$ (Durango). Biss. normale à p. $n_g = 1,621$ (raie D) ; $n_m = 1,613$; $n_p = 1,611$.

La topaze est pyroélectrique. Cassure conchoïdale ; éclat vitreux ; couleur jaune paille ou jaune de vin (Saxe, Bohême) ; jaune rougeâtre (Brésil), blanche, grisâtre, verdâte ou bleuâtre (Sibérie, avec les formes des figures 421 et 422). La variété du Brésil, calcinée, prend une teinte rose (*Topaze brûlée*). Inattaquable aux acides, infusible. Chauffée dans le tube ouvert avec le sel de phosphore, donne la réaction du fluor. Se dissout partiellement dans ce sel, avec squelette de silice. Réact. 78.

La topaze est très fréquente, avec quartz et tourmaline, dans les gîtes stannifères et en compagnie des pegmatites. On y observe des inclusions aqueuses, avec petits cristaux cubiques et rhombiques. La topaze du Brésil renferme des inclusions à deux liquides, eau et acide carbonique, ou bien hydrocarbures. La topaze figure comme élément microscopique de beaucoup de phyllades.

Étym : Le nom de topaze vient de Τόπαζος, île de la mer Rouge, d'où Pline a fait *Topazius*. Mais la topaze de Pline n'était pas celle que nous venons de décrire et que le même auteur classait avec la *chrysolite*.

La *Pycnite* ou *Stangenstein* est une variété de topaze bacillaire, jaunâtre ou rougeâtre, associée au quartz et au mica dans les gîtes stannifères de Saxe et de Bohême ; les faces m, g^1, g^3 y dominent, avec le clivage p. La dureté n'est que 7,5. Les cristaux sont allongés en zone positive suivant $h^1\ g^1$.

Émeraude ou Béryl. $Gl^3 Al^2 Si^6 O^{18}$ (1). — P. S. = 2,67 à 2,75. — D. = 7,5 à 8. — 63 à 68. SiO^2; 16 à 19. Al^2O^3; 12 à 15. GlO; avec de petites quantités de Fe^2O^3, MgO, CaO, Na^2O, parfois des traces de chrome et de lithine.

S. hexagonal. R. A. = 1 : 0,499. $pb^1 = 150°3'$; $pb^1/_2 = 130°57'$; $pa^1 = 135°4'$. En réalité, d'après Mallard, la symétrie hexagonale n'est qu'apparente et les nombreuses anomalies optiques de l'émeraude, notamment la dislocation presque constante des anneaux colorés en lumière convergente, conduisent à la ranger dans le système rhombique.

Combinaisons habituelles : *mp*; mpa^1; mh^1p; $mh^2h^1pa^1$; $mpa^1b^1b^1/_2a_2$ (fig. 423), la face a_2 (*x*) formant zone avec *m*, a^1 et b^1. Quelquefois le pointement

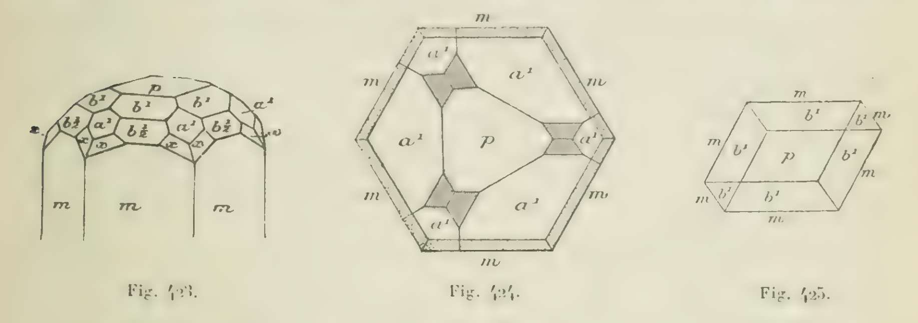


Fig. 423. Fig. 424. Fig. 425.

supérieur prend, par le développement de certaines faces, une apparence dyssymétrique (fig. 424, 425) (2).

Les faces *m* et h^1, unies dans l'émeraude verte, sont striées dans le béryl parallèlement à leurs intersections mutuelles et donnent naissance à des prismes cannelés, souvent arrondis par suite de la coexistence de plusieurs formes prismatiques.

Clivage net suivant *p*; interrompu suivant *m*.

Éclat vitreux; transparente ou translucide. Cassure conchoïdale ou inégale.

Opt. Réfr. peu énergique, négative. $n_o = 1,575$ (Béryl) à 1,584 (Émeraude de Muso); $n_e = 1,570$ à 1,578. Polychroïsme parfois bien marqué.

Le nom d'émeraude est réservé d'ordinaire aux variétés vertes, employées comme gemmes, tandis que le nom de *Béryl* désigne les variétés incolores, roses, jaunes, bleu de ciel, ainsi que les variétés pierreuses, ces dernières n'offrant d'ordinaire que les faces *m* et *p*. Enfin le nom d'*Aigue-Marine* désigne les cristaux prismatiques d'un vert bleuâtre de Sibérie.

(1) MM. Penfield et Harper (*Amer. Journ.*, 1886, XXXII, p. 107) admettent la formule $H^2Gl^6Si^{12}O^{37}$ pour le béryl, toutes les variétés analysées, à l'exception de celle d'Adun-Tschilon, contenant de 1 à 2 % d'eau. — (2) Dans la figure 424, où trois faces a^1 prédominent sur les trois autres, les faces couvertes de hachures doivent être notées b^1 et celles que signale un grainé fin appartiennent au didodécaèdre a_2, lequel fait partie de la zone b^1a^1m.

Ch. Difficilement fusible sur les bords en scorie bulleuse. Avec le borax, l'émeraude donne une perle d'un vert pâle et le béryl un verre incolore.

Au rouge sombre, l'émeraude devient blanche et opaque; aussi sa couleur a-t-elle été attribuée à un hydrocarbure, dont on a cru constater l'existence par l'analyse. Cependant Vauquelin et après lui Wöhler ont cherché à établir que le principe colorant était l'oxyde de chrome, dont l'émeraude de Muso renferme 0,186 %.

L'émeraude et le béryl abondent dans les pegmatites et les gîtes stannifères; mais la belle variété de Muso (Nouvelle-Grenade) se trouve disséminée, avec quartz, calcite et pyrite, dans un calcaire bitumineux néocomien. Plusieurs micaschistes sont pénétrés d'émeraude verte. Les pegmatites de l'île d'Elbe renferment de jolis cristaux incolores, implantés dans les géodes avec quartz et tourmaline. Certains cristaux de béryl bleu de l'Altaï ont 1 mètre de long sur 0,15 de diamètre. Enfin des cristaux de béryl pierreux atteignent, dans le New-Hampshire, des dimensions gigantesques, pesant jusqu'à 1500 kilogrammes. Quelques cristaux de béryl sont courbes.

On rencontre des pseudomorphoses dans lesquelles la forme de l'émeraude ayant été respectée, sa substance est remplacée par le Kaolin, le mica, le quartz ou la limonite.

Étym. : Les noms d'Émeraude et de Béryl nous viennent des Grecs : l'identité spécifique des deux variétés était déjà soupçonnée du temps de Pline.

A côté de l'émeraude et de la topaze, et souvent associées dans leurs gisements avec ces espèces, viennent se placer deux autres gemmes, constituées par des silicates de glucine.

Le premier de ces silicates est la **Phénacite** ou **Phénakite**, Gl^2SiO^4. — P. S. = 2,96 à 3,0. — D. = 7,5 à 8. — 54,27. SiO^2; 47,73. GlO.

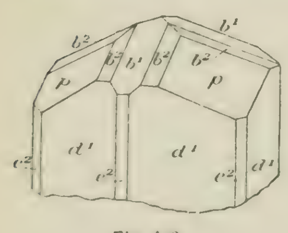


Fig. 426.

S. rhomboédrique. R. A. = 1 : 0,6611 ; *pp* = 116°36′. Formes : pd^1 ; $e^2d^1pb^1b^2$ (fig. 426); e^2d^1 $(b^1/_2d^1d^1/_2)$, clivages difficiles *p* et d^1; cassure conchoïdale ou inégale; macle e^2. — Réfr. positive; $n_o = 1,654$ (raie D); $n_e = 1,6697$.

Incolore, jaune ou brune; infusible, inattaquable, donnant avec le sel de phosphore un squelette de silice, la phénacite pourrait quelquefois être confondue avec le quartz. On l'en distinguerait par l'emploi de l'azotate de cobalt (Réact. 82) et aussi par l'absence de polarisation rotatoire.

Abondante au milieu des micaschistes de Sibérie, avec émeraude, ainsi que dans les pegmatites à topaze de l'Oural ou des États-Unis, la phénacite a été trouvée dans les gîtes d'hématite brune de Framont (Vosges), où elle forme des groupements de six cristaux à axe ternaire commun.

Étym. : φέναξ, trompeur, parce qu'on l'avait d'abord prise pour du quartz.

Le second silicate est l'**Euclase**, $H^2Gl^2Al^2Si^2O^{10}$. — P. S. = 3,09 à 10. — D. = 7,5. — 42. SiO^2; 34. Al^2O^3; 17. GlO; 6. H^2O; 0,38. Fl.

S. monoclinique. R. A. = 0,324 : 1 : 0,333; $mm = 144°45'$; ph^1 100°16'; $a^1h^1 = 130°51'$; g^3g^3 ant. = 115°0'; g^2g^2 ant. = 92°36'; $e^1g^1 = 108°9'$ (1).

Combinaisons $g^1g^3\{b^1/_2 d^1/_4 g^1\}$, $g^2g^3d^1/_2 p e^1\{b^1/_2 d^1/_2 g^1\}\{d^1/_3 b^1/_5 g^1\}$. Clivage g^1 très facile et très net. Cassure conchoïdale, éclat vitreux, couleur vert d'eau pâle ou bleu de ciel.

Opt. Réfr. positive. A. O. dans g^1. $\rho > v$. $2V = 49°6'$; $2E = 88°$ (raie D). Biss. parallèle à a^1 et faisant avec l'axe vertical un angle de 49°. $n_g = 1,6707$; $n_m = 1,655$; $n_p = 1,6517$ (pour la raie D). Polychroïsme assez marqué.

Ch. Les esquilles minces finissent par fondre avec gonflement en émail blanc. L'euclase se dissout avec effervescence dans le borax et le sel de phosphore. Elle est inattaquable aux acides.

L'espèce accompagne, au Brésil et dans l'Oural, le quartz et la topaze.

Étym. : L'euclase doit son nom, donné par Haüy, à la facilité de son clivage.

On connaît maintenant, sous le nom de **Bertrandite**, un silicate hydraté de glucine, en petits cristaux blancs, rhombiques (avec angle voisin de 120°), de signe négatif, implantés soit sur des prismes de béryl au Colorado, soit dans les géodes de la pegmatite de Barbin, près de Nantes, avec cristaux d'apatite.

TROISIÈME FAMILLE. — SILICATES ACCESSOIRES DES SYÉNITES ÉLÉOLITIQUES

Zircon. $ZrSiO^4$. — P. S. = 4,1 à 4,8; moyenne, 4,68 à 4,7. — D. = 7,5.

S. quadratique. R. A = 1 : 1,281 (2). $b^1b^1 = 95°40'$ sur $p = 123°20'$ sur arêtes culm.; $b^1m = 132°10'$. Combinaisons habituelles : b^1; mb^1 (fig. 427), ne laissant parfois qu'un rudiment de m sur les arêtes horizontales de l'octaèdre (Pouzac); mh^1b^1, fréquente dans le zircon hyacinthe d'Expailly; h^1b^1 (fig. 428), quelquefois disposée de manière à rappeler un dodécaèdre rhomboïdal (fig. 429); $h^1b^1a_2$ (fig. 430), dans le zircon des monts Ilmen, etc. Les faces a_2 prédominent dans le zircon des sables aurifères, donnant aux cristaux la forme d'une double pyramide tronquée par b^1 et par les deux prismes m et h^1.

Clivage net suivant m et b^1. Cassure conchoïdale ou inégale.

Réfr. énergique, positive : $n_o = 1,925$ (rouge); $n_e = 1,975$.

Éclat vitreux, souvent adamantin. Rouge, brun, jaune, gris, vert, incolore. Infusible au chalumeau; insoluble dans le sel de phosphore; difficilement soluble dans le borax. Les cristaux colorés perdent leur teinte par la calcina-

(1) Rammelsberg a donné à la forme primitive de l'Euclase une autre position : gardant seulement g^1, il change m en $d^1/_2$, p en a^1, g^3 en $d^1b^1/_3g^2$. Alors on a R. A. = 0,421 : 1 : 0,504 et $ph^1 = 91°40'$. — (2) Au lieu de cette valeur, M. Zirkel adopte 1 : 0,640, ce qui fait que b^1 se change en $b^1/_2$. Certains auteurs changent m en h^1, ce qui donne R. A. = 1 : 0,906.

tion et deviennent phosphorescents. La poudre ne peut être attaquée que par une longue digestion avec l'acide sulfurique. Fondu avec la soude ou la potasse et dissous dans l'acide chlorhydrique concentré, le zircon communique au papier de curcuma une teinte orangée.

Le zircon jaune et brun abonde dans les syénites éléolitiques, qualifiées pour ce motif de *zirconiennes*. La variété *hyacinthe*, aux arêtes adoucies, se rencontre dans les basaltes et les tufs, notamment ceux d'Expailly ou Espaly (Riou Pezzouliou), dans la Haute-Loire, où les arêtes des cristaux sont généralement arrondies par l'attaque du magma basaltique, qui a emprunté ces cristaux à des blocs de granulite (A. Lacroix). Enfin le zircon existe dans les alluvions auri-

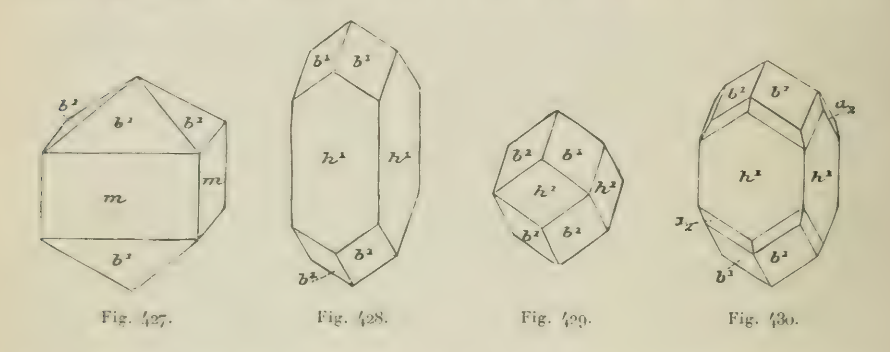


Fig. 427. Fig. 428. Fig. 429. Fig. 430.

fères de beaucoup de localités, où il se trouve en compagnie de plusieurs autres gemmes, et fournit à la joaillerie des pierres estimées.

On désigne sous le nom de *Malacon* un zircon hydraté à 3 % d'eau, isomorphe avec celui que nous venons de décrire, mais monoréfringent, ayant P. S. = 3,9 à 4,0 et D. = 6.

Le zircon, en cristaux taillés suivant p, présente des anomalies optiques qui conduisent à l'idée d'une symétrie monoclinique. Mais l'espèce se comporte rigoureusement comme un minéral uniaxe dans les lames minces de roches, où le zircon est fréquemment entouré de larges auréoles polychroïques, développées surtout lorsque le minéral est enclavé dans le mica ou la cordiérite.

A la suite du zircon, nous mentionnerons, comme faisant partie des syénites à éléolite de Frederiksvärn, deux silicates de chaux, de magnésie et de glucine, alliés avec du fluorure de sodium.

Le premier est le **Leucophane**, $Na^2(Gl,Ca,Mg)^5Si^5O^{12}Fl^2$. — P. S. = 2,96. — D. = 3,5 à 4. — 47 % SiO^2 avec 6 à 6,5. Fl. — S. monoclinique, pseudo-quadratique. R. A. = 1,061 : 1 : 1,054. $ph^1 = 90°$; $mm = 91°$. Clivage p parfait. — Signe optique négatif; Biss. normale à p; $\rho > v$. A. O. dans h^1; 2E variable de 0° à 75°. $2V = 44°$. $n_g = 1,594$; $n_m = 1,591$; $n_p = 1,570$.

Ce minéral, en cristaux imparfaits d'un blanc grisâtre, donne, par le choc ou par l'action de la chaleur, une lueur bleue phosphorescente.

Le second silicate est le **Mélinophane**, $Na^4(Gl,Ca)^{12}Si^9O^{30}Fl^4$. — P. S. = 3,02. — D = 5. Très voisin du précédent par sa composition, il cristallise dans le système quadratique (R. A. = 1 : 0,658). Il se présente en masses cristallines jaune de miel (d'où le nom) ou jaune citron, à clivage p très facile. Signe opt. négatif; $n_o = 1,611$; $n_e = 1,592$.

Les syénites éléolitiques sont aussi le gisement d'un silico-zirconate de chaux, soude et fer, l'**Eudialyte**, $Na^2(Ca,Fe)^2(Si.Zr)^6O^{15}$. Cette espèce, rhomboédrique (R. A = 1 : 2,112 ; $pp = 73°30'$) et soluble en gelée dans les acides, forme deux variétés : l'*Eudialyte* proprement dite du Groenland (P. S. = 2,95), rosée, avec clivage a^1 et signe optique positif, et l'*Eucolite* de Norvège (P. S. = 2,84), avec clivage d^1 et signe négatif. On a, pour la seconde, $n_o = 1,622$; $n_e = 1,618$. La biréfringence de l'Eudialyte ne dépasse pas 0,003.

Leymerie a proposé de réunir, sous le nom de *Silicates boréens*, un certain nombre d'espèces qui, rencontrées presque exclusivement dans les syénites éléolitiques, les gneiss et les pegmatites de la Scandinavie, offrent ce caractère de renfermer dans leur composition divers éléments, très rares partout ailleurs, tels que : yttrium, thorium, cerium, lanthane, didyme, niobium, tantale, hélium, etc.

La plupart de ces espèces sont liées entre elles par des analogies physiques incontestables. Elles ont généralement une couleur noire ou brune, avec un éclat vitro-résineux, et sont presque infusibles. Nous nous bornerons à quelques indications sur les principaux types.

Cérérite ou **Cérite**, $H^6(Ca,Fe)^2Ce^6Si^6O^{26}$. — P. S. = 4,9 à 5. — D. = 5,5. — 15 à 20. SiO^2; 30 à 65 oxyde céreux ; 7 à 39 oxydes de La et Di, avec hélium. — S. rhombique. $mm = 90°4'$. Infusible au chalumeau.

Thorites. — Ce nom désigne des silicates hydratés de thorium, qui sont isomorphes du zircon et paraissent dériver de l'altération de $ThSiO^4$. On a $mb^1/_2 = 133°30'$.

On distingue la variété brune ou Thorite proprement dite et la variété jaune ou Orangite, dont la première ne serait peut-être qu'un état d'hydratation plus avancé.

Thorite, H^4ThSiO^6. — P. S. = 4,4 à 4,7 ; en masses amorphes à cassure conchoïdale, ou résineuses, optiquement isotropes.

Orangite, $H^6Th^2Si^2O^{11}$. — P. S. = 5,2 à 5,4. — D. = 4,5. Se décolore au chalumeau en restant infusible. Contient un peu d'hélium.

Gadolinite, $FeGl^2(Y,Gd)^2Si^2O^{10}$. — P. S. = 4, à 4,3. — D. = 6,5. — S. mono-

clinique. R. A. = 0,527 : 1,32 ; ph^1 = 91°33′ ; mm = 115°48′ ; pe^1 = 127°7′ (1). Réfr. positive. A. O. dans g^1. Biss. située dans l'angle obtus ph^1 et faisant avec l'axe vertical un angle de 8° à 13° (ce dernier chiffre pour le jaune) (2). 2H varie de 100°,1 (rouge) à 109°,7 (bleu) ; 2V = 85°28′ (jaune) ; $\rho < v$.

L'espèce où le Dr Gadolin a découvert l'yttria, et qui contient aussi du cerium, est très peu homogène et renferme des variétés biréfringentes de formule R^3SiO^5, d'autres monoréfringentes, probablement pseudomorphes des premières et de formule R^2SiO^3, d'autres enfin offrant un mélange des deux éléments. Les caractères communs sont un éclat vitreux prononcé, une cassure conchoïdale, une transparence complète en fragments, avec couleur vert d'herbe ou vert olive. Soluble en gelée dans l'acide chlorhydrique.

Orthite. — L'orthite répond à la formule générale $H^2(Ca, Fe)^4(R^2)^3Si^6O^{26}$, où R = Al,Ce,Di,La,Y,Er,Fe. — P. S. = 3,37 à 3,8. — D. = 5 à 6. La variété brun rouge avait été désignée sous les noms d'**Allanite** et de **Cérine**. Mais il n'y a pas de motifs pour maintenir cette distinction.

S. monoclinique. R. A. = 1,553 : 1 : 1,778 ; mm = 70°48′ ; ph^1 = 114°. Réfr. négative. Biss. partageant sensiblement en parties égales l'angle obtus ph^1. A. O. dans g^1 ; 2V = 65° à 70° ; 2H = 92° à 115°3 ; n_m = 1,682. Biréfringence variable de 0 à 0,32.

Éclat résineux ; fusible au chalumeau en émail noir magnétique. Forme des baguettes noires, allongées et aplaties, dans le feldspath. On distingue des orthites peu hydratées, biréfringentes, telles que l'orthite de Snarum, l'*Ouralorthite*, etc., et d'autres, plus hydratées, monoréfringentes, auxquelles se rattache la *Pyrorthite* de Fahlun.

Les minéraux qui viennent d'être énumérés, et qu'on a coutume d'appeler les silicates des *terres rares*, peuvent se grouper en deux familles : la première, qui a pour type la Cérite, contient surtout les *terres cériques*, c'est-à-dire à cerium dominant, après quoi viennent les Lanthane, Didyme (Néodyme et Praséodyme), Samarium, Europium. Dans la seconde famille, celle des terres *yttriques*, qui a pour type la Gadolinite, se rencontrent principalement avec le Gadolinium, les Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium, Lutecium, mais surtout l'Yttrium, qui forme au moins 80 % de l'ensemble.

Toutefois, il convient d'observer qu'il n'y a jamais de terres yttriques sans terres cériques et, jusqu'ici, il n'est aucun minéral où l'on ait trouvé un seul des éléments du groupe à l'exclusion des autres (4).

Citons encore, parmi les minéraux silicatés de ce groupe, la **Tscheffkinite**, silicotitanate de Ce,La,Di,Fe,Mn,Ca, fusible au chalumeau ; la **Mosandrite**,

(1) Données nouvelles, déterminées par M. Eichstadt sur une série exceptionnelle d'échantillons d'Hitteroe. Auparavant, on admettait R. A. = 0,625 : 1 : 0,659 ; ph^1 : 90°32. — (2) D'autres auteurs indiquent seulement 3°,5. — (3) Des Cloizeaux, *Manuel*, p. XIII. — (4) Nous devons la connaissance de ces faits à une obligeante communication de M. Urbain.

de composition analogue, monoclinique (R. A. = 1,081 : 1 : 0,814; mm = 88°36′; ph^1 = 108°36′). — P. S. = 2,93 à 3. — D. = 4; la **Catapléite**, silicozirconate hydraté de Na,Ca,Fe (P. S. = 2,8. — D. = 6), de symétrie hexagonale ou pseudohexagonale (R. A. = 1 : 1,35; pb^1 = 122°40′), de signe optique positif; la **Wöhlérite**, silicozircononiobate de chaux et de soude, en lames jaune de miel, à cassure résineuse. Symétrie monoclinique (R, A. = 1,055 : 1 : 0,709; mm = 90°14′; ph^1 = 109°15′). Clivage g^1 facile. Réfr. négative. A. O. dans o^1. Biss. (raie D) coïncide avec l'arête o^1g^1. 2V = 72 à 77°. 2H = 85°41′. $\rho < v$; $n_g = 1,726$; $n_m = 1,716$; $n_p = 1,700$.

DEUXIÈME ORDRE

ÉLÉMENTS SILICATÉS DES ROCHES BASIQUES

PREMIÈRE CLASSE

ÉLÉMENTS ESSENTIELS

Les éléments essentiels des roches basiques sont (avec les moins acides des feldspathides ou quelques-uns des feldspathoïdes déjà décrits) des silicates de formules $RSiO^3$ et R^2SiO^4, ne contenant d'alumine que par exception et probablement à l'état de mélange. L'oxyde ferreux, la magnésie et la chaux en forment les bases fondamentales. Un premier groupe, où la chaux existe toujours, constitue la famille des pyroxènes et des amphiboles (minéraux *trappéens* de Leymerie); un autre comprend les diverses variétés du Péridot.

FAMILLE DES PYROXÈNES ET DES AMPHIBOLES

La famille des pyroxènes et des amphiboles constitue un groupe très homogène, où la plupart des minéraux sont essentiellement des *métasilicates* de calcium, de magnésium et de fer, c'est-à-dire des composés de l'acide *métasilicique* $Si[OH]^2O$, pouvant être représentés par la formule $(Ca,Mg,Fe)SiO^3$ ou mieux $(Ca,Mg,Fe)^2(SiO^3)^2$; mais beaucoup parmi eux sont plus compliqués et peuvent renfermer une proportion parfois considérable de sexquioxydes, ainsi que des alcalis, surtout de la soude.

Leur forme cristalline peut offrir trois genres de symétrie : rhombique, monoclinique et triclinique, ce dernier plus exceptionnel (1). Mais, quelle que

(1) Les espèces qu'on peut considérer comme des amphiboles ou des pyroxènes tricliniques ne seront pas mentionnées ici, l'une d'elles étant rejetée parmi les minerais.

soit la symétrie, tous se groupent, en raison de leurs clivages et de leurs caractères optiques, autour de deux types ; l'un répondant à un prisme de 87° à 93° d'angle ; l'autre où les clivages dénotent un prisme voisin de 124 degrés. Au premier type répond le genre *pyroxène*, au second le genre *amphibole*, et tous deux donnent naissance à des séries très symétriques l'une de l'autre.

PYROXÈNES MONOCLINIQUES

Considérons d'abord les pyroxènes (1) monocliniques. Chez tous, la chaux se trouve en proportion au moins égale et généralement supérieure à celle de la magnésie. Mais on peut distinguer deux divisions, dont la première est pauvre en alumine tandis que la seconde en renferme jusqu'à 8 %. Toutes deux ont les mêmes caractères cristallographiques, c'est-à-dire : R. A. $= 1,0947 : 1 : 0,5915$ (2) ; $mm = 87°5'$; $ph^1 = 105°49'$; $d^1/_2\, d^1/_2 = 131°30'$ en arrière ($131°37'$ calculé) ; $b^1/_2\, b^1/_2 = 120°48'$ en avant ($120°37'$ calculé) ; $a^1/_3\, h^1 = 144°29'$. Signe optique généralement positif ; A. O. dans g^1. Biss. faisant, avec l'arête verticale, dans l'angle obtus ph^1, un angle variable de 38° à 45° (3). 2V compris entre 59° et 68°. Indice n_m variant de 1,68 à 1,74. Polychroïsme faible. Dispersion inclinée nette.

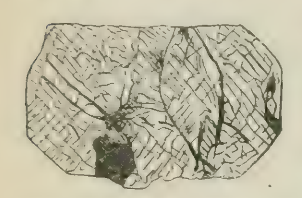


Fig. 431. — Section basique de cristal d'augite d'une téphrite. Grossissement : 30 diamètres. — D'après M. Rosenbusch.

Tous les pyroxènes paraissent être holoédriques. La plupart se clivent avec facilité suivant les faces *m* du prisme. Les fissures qui mettent ce clivage en évidence dans les plaques minces sont toujours nettes et nombreuses, mais pas exactement rectilignes. Dans les sections à peu près normales à l'axe vertical, ces fissures se croisent sous des angles peu différents de 90° (fig. 431). Dans les sections parallèles à l'axe du prisme, elles sont parallèles entre elles (fig. 432).



Fig. 432. — Cristal d'augite coupé parallèlement à l'axe vertical. — D'après M. Rosenbusch.

Bien que les pyroxènes monocliniques forment en réalité une série continue, on peut, en considérant les principaux types, distinguer les sous-genres suivants :

(1) Le nom de *pyroxène* vient de πῦρ, feu, et ξενός, étranger, parce que, sous l'empire d'une idée erronée, Haüy regardait ce minéral comme un étranger dans le domaine des roches ignées. — (2) Ces nombres sont ceux de Des Cloizeaux. Les chiffres de M. Zirkel et de M. Tschermak (1,09 : 1 : 0,589, avec $ph^1 = 74°11'$) ne concordent pas avec l'angle *mm*, indiqué de 87°6', mais exigent 87°16'. — (3) Sauf pour les augites vertes, allongées, sodifères, où l'angle peut aller jusqu'à 98°, comme dans l'ægirine.

PREMIER SOUS-GENRE

Diopside. $Ca(Fe,Mg)Si^2O^6$. — P. S. = 3,3. — D. = 5 à 6.

54 à 55. SiO^2; 24 à 25. CaO; 18 à 19. MgO; 1 à 4,5. FeO; 0,2 à 2. Al^2O^3. En général, le rapport de Fe à Mg est plus petit que celui de 1 à 3.

Combinaisons habituelles : h^1g^1p; h^1g^1mp; $h^1g^1md^1/_2a^1p$; la même avec e^1 et $b^1/_4$ (fig. 433). Souvent, comme dans la figure, les faces h^1 et g^1 prédominent, donnant aux cristaux, généralement allongés, une apparence quadratique; $pm = 100°57'$; $a^1h^1 = 105°22'$.

Macles fréquentes parallèles à h^1. Clivages : m parfait, h^1 et g^1 moins faciles.

Dispersion inclinée, notable pour les axes apparents, nulle pour les axes réels, 2V = 59°; 2E = 111°6'. n_g = 1,7026 (D); n_m = 1,6798; n_p = 1,6726. Biss. inclinée de — 38°,9 sur l'axe vertical.

Cassure conchoïdale ou inégale; transparent ou translucide. Incolore, vert pâle ou vert d'herbe. Fusible au chalumeau. Réact. 80. Inattaquable. Se trouve souvent en cristaux associés au grenat et au clinochlore.

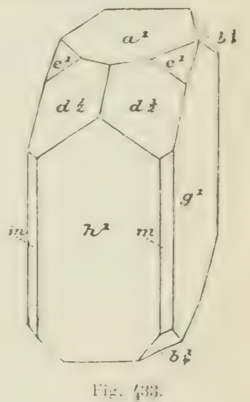


Fig. 433.

La variété d'Ala (Piémont) a été nommée *Alalite*.

La couleur du diopside en plaque mince est le vert pâle.

Etym : δίς, double, et ὄψις, vue (d'après Dana); ou δία, à travers, et ὄψις, vue, à cause de sa transparence (Leymerie).

Malacolite. — Dans cette espèce, qui répond à la même formule que le diopside, le rapport de Fe à Mg varie entre 1/3 et 1. Le minéral, associé aux minerais de fer d'Arendal, est blanc, bleuâtre ou vert. n_m = 1,69 (rouge); 2V = 58°,6; angle de la Biss. avec l'arête verticale = — 40°,4. La biréfringence ne dépasse pas 0,025.

Rare dans les roches éruptives, la Malacolite abonde parmi les schistes cristallins et les calcaires subordonnés.

Dans le voisinage de cette espèce se place la *Salite*, diopside qui peut contenir jusqu'à 20 °/₀ FeO. Elle se trouve à Sala (Suède), en masses laminaires d'un vert sombre. On y doit rapporter la *Baïkalite*, vert très sombre, du lac Baïkal, et la *Coccolite*, vert olive, en masses granulaires. La densité varie de 3,2 à 3,3. Ces trois variétés offrent souvent la combinaison $h^1mg^1a^1$, parfois avec h^2 et g^2.

L'**Hédenbergite** est un diopside très peu magnésien, contenant de 15 à 20 °/₀ FeO et généralement moins de 7 °/₀ MgO. — P. S. = 3,5. — D. = 5,5. — Facilement fusible au chalumeau en verre magnétique, n_m = 1,710 (rouge); 2V = 60°. Angle de la bissectrice = — 45°,9. Forme des masses laminaires d'un vert foncé dans le gîte métallifère de Tunaberg.

Etym. : Dédiée à Hedenberg.

DEUXIÈME SOUS-GENRE.

Diallage. — Isomorphe avec le diopside; mais plus riche en fer (10 à 14 °/₀) et contenant de 1 à 4 °/₀ d'alumine. — P. S. = 3,2 à 3,34. — D. = 4.

Masses laminaires pourvues d'un clivage h^1 très facile, à éclat nacré et métalloïde; quelquefois avec clivages m. La diallage du Tyrol, en lames aplaties suivant h^1, porte les facettes m, g^1 et $b^1/_2$. Grise, gris verdâtre, brun tombac, poussière blanche. Facilement fusible en émail; inattaquable.

Le clivage facile h^1 montre un axe optique. Biss. n_g inclinée de — 39° à — 46° sur l'axe du prisme. Polychroïsme faible. $n_g = 1,703$; $n_m = 1,681$; $n_p = 1,679$.

La diallage offre une tendance marquée à l'*ouralitisation*, c'est-à-dire à la transformation en amphibole.

En lamelles dans les euphotides, les gabbros et les serpentines. Les sections de la zone h^1g^1 s'éteignent de 38°44′ à 0°; celles de pg^1 sont le plus souvent éteintes entre 38° 44′ et 35°; les autres extinctions de la zone sont comprises entre 0° et 35°.

Étym : διαλλαγή, différence, à cause de la différence entre le clivage facile h^1 et un clivage difficile g^1.

Une partie de l'*Omphazite* verte qui, associée au grenat et au disthène, forme les éclogites de la Bavière et de la Carinthie, paraît, en raison de ses clivages, devoir être attribuée à la diallage.

Augite. — Contenant jusqu'à 8 °/₀ d'alumine, avec 45 à 51. SiO^2; 18 à 23. CaO et 13 à 16. MgO. — P. S. = 3,3 à 3,5. — D. = 5 à 6.

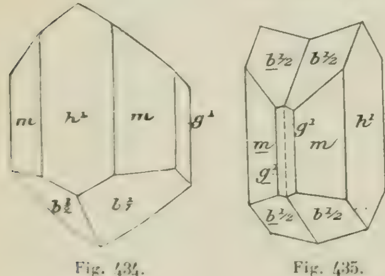


Fig. 434. Fig. 435.

M. Tschermak considère l'augite comme formée par le mélange isomorphe de Ca (Fe,Mg)Si^2O^6 avec $MgAl^2SiO^6$.

Combinaisons habituelles : $mh^1g^1b^1/_2$ (fig. 434), avec $mh^1 = 133°32'$; quelquefois on voit les faces p, a^2, $d^1/_2$ et $b^1/_4$. Macles fréquentes parallèlement à h^1, avec ligne de suture sur g^1 et angle rentrant formé par deux faces $b^1/_2$ (fig. 435). Clivages : m plus ou moins parfait; moins facile suivant h^1 et g^1.

Opt. — L'angle de la Biss. avec l'arête verticale varie de — 39° (augites brunes) à — 54° et plus (augites vertes allongées, sodifères). Le polychroïsme en lame mince n'est sensible que dans les variétés sodifères des roches à leucite, des phonolites et des téphrites, où la couleur varie du vert olive ou du vert d'herbe au brun rouge.

$2V = 60°$ à $68°$; $n_g = 1,733$ à $1,728$; $n_m = 1,717$ à $1,712$; $n_p = 1,712$ à $1,706$.

Cassure écailleuse; couleur noire ou vert olive; poussière gris verdâtre. Fond

au chalumeau en verre noir, quelquefois magnétique. Donne parfois au borax la réaction du manganèse. Faiblement attaquée par les acides.

En cristaux nets dans des calcaires cristallins, de nombreuses roches volcaniques et des tufs, où la couleur noire est mate et où le prisme, octogonal par combinaison de m, h^1 et g^1, est peu allongé suivant l'arête de sa zone.

L'augite en masses fibreuses vertes est l'élément caractéristique des diabases, des pyroxénites et des diverses autres roches basiques. Elle s'y transforme très facilement en amphibole (*ouralitisation*), c'est-à-dire que les formes extérieures restant celles de l'augite, les clivages deviennent ceux de l'amphibole.

Étym. : αὐγή, éclat.

L'Augite se présente fréquemment dans les roches à l'état de petits cristaux, allongés d'ordinaire parallèlement à l'arête $h^1 g^1$. Les sections les plus importantes sont celles de la zone $h^1 g^1$, lesquelles s'éteignent sous des angles compris entre 0° et 39° ou 45° pour les augites brunes avec signe positif; pour les augites vertes et sodifères (des roches à leucite et néphéline), la même zone est tantôt positive, tantôt négative, avec maximum d'extinction à 40° environ (croissant en même temps que la teneur en soude). Le polychroïsme est très peu sensible, excepté quand les cristaux sont très colorés. Les inclusions liquides sont extrêmement rares; mais il y a beaucoup d'inclusions vitreuses et de cavités à gaz.

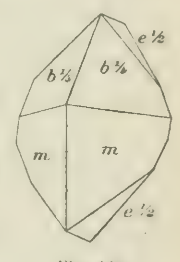


Fig. 436.

La *Schefférite* est une augite manganésifère.

La **Fassaïte** de la vallée de Fassa (Tyrol), en cristaux verts, opaques, ayant l'apparence de prismes quadratiques où dominent, avec m, les faces $b^1/_2$, $b^1/_4$, $d^1/_2$, $d^1/_4$ et parfois $e^1/_2$ (fig. 436), est une augite qui se présente, ainsi que la variété *Pyrgome*, dans un calcaire, au contact d'une roche éruptive basique.

La plus grande partie de l'*Omphazite* des éclogites, en grains arrondis ou en agrégats bacillaires courts, possède des clivages et des angles d'extinction qui doivent la faire rapporter à l'Augite (1).

TROISIÈME SOUS-GENRE.

Ægirine. — Un troisième sous-genre est formé par les pyroxènes sodifères, dont le type est l'*Ægirine* ou *Ægyrine*, minéral des syénites à néphéline et de certaines autres roches éruptives, et aujourd'hui considéré comme identique avec l'**Acmite**. La chaux y est en majeure partie remplacée par la soude, dont la proportion peut s'élever jusqu'à 13 %.

$Na^2Fe^2Si^4O^{12}$. — P. S. = 3,5 à 3,55. — D. = 6 à 6,5.

R. A. = 1,097 : 1 : 0,601 ; $mm = 87°4'$: $ph^1 = 106°51'$.

(1) Rosenbusch, *Mikr. Physiographie*, p. 453.

Cristaux allongés suivant l'axe vertical, formes m, h^1, $b^1/_2$, g^1, e^1, p. Clivages m plus faciles que pour l'augite ; macles h^1.

Opt. — Signe négatif. A. O. dans g^1. Biss. n_p fait un angle très faible (5°) avec l'axe vertical dans l'angle obtus ph^1. $\rho < v$. $2V = 62°$. $n_m = 1,80$. Biréfringence : 0,05. Polychroïsme intense, du vert d'herbe au brun jaunâtre.

L'Ægirine fond assez facilement au chalumeau. Ce caractère, joint à la forte densité du minéral, au signe négatif de son allongement et à sa biréfringence élevée, suffit à distinguer l'espèce des autres pyroxènes.

Dans le voisinage immédiat de l'Ægirine vient se placer la **Jadéite**, silicate d'alumine sodifère, spécifiquement distingué par M. Damour (1). Cette espèce renferme 59. SiO^2 ; 24. Al^2O^3 ; 14. Na^2O, avec un peu de chaux, d'oxyde ferrique et de magnésie. Sa formule serait $Na^2Al^2Si^4O^{12}$, c'est-à-dire celle du triphane, avec la soude remplaçant la lithine.

P. S. = 3,3 à 3,5. — D. = 6,5 à 7. — S. monoclinique ; $mm = 85°20'$ (2). Clivage m assez facile.

Opt. — A. O. dans g^1 ; signe positif. Biss. inclinée sur l'axe mm de — 31° à — 41°. (Ce sont ces données qui font ressortir l'analogie de la Jadéite avec le Pyroxène). 2V voisin de 70° ; $\rho > v$; Biréfringence : $n_g - n_p = 0,029$.

Massive, avec un éclat subvitreux, la Jadéite est verte, parfois d'un vert aussi franc que celui de l'amazonite, vert bleuâtre ou blanche, translucide, à cassure esquilleuse, et montre au chalumeau une remarquable fusibilité, qui suffit, avec sa densité notable, à la distinguer des minéraux verts avec lesquels elle a été autrefois confondue sous le nom générique de *Jade*. Ainsi les esquilles minces fondent, sans qu'il soit nécessaire de souffler, à la flamme de l'alcool. Réact. 78.

La Jadéite, connue en place au Tibet et en Birmanie, est utilisée en Chine, avec d'autres pierres d'aspect analogue, mais de composition différente, pour la fabrication des objets d'ornement dits de *Jade*. Elle a été aussi travaillée par les anciens Mexicains.

La *Chloromélanite*, élément dominant des anciennes haches polies de la Bretagne, est une jadéite très ferrugineuse (3,5 à 14. Fe^2O^3).

Non loin de là viendrait se placer, selon M. Damour, le *jade océanique* de la Nouvelle-Calédonie et des îles Marquises, caractérisé par P. S. = 3,18 et D. = 5,5 à 6,5.

Quant à la **Violane** (ainsi nommée de sa couleur) des gîtes de manganèse du Piémont, où l'analyse révèle 56. SiO^2 ; 9. Al^2O^3 ; 14. CaO, un peu de Na, Fe, Mn, avec P. S. = 2,23 ; D. = 6, ce serait une variété bleue de diopside avec un peu de jadéite et d'ægirine.

(1) *Bull. soc. minéral.*, 1881, p. 158. — (2) Krenner indique 86°55', et plusieurs auteurs considèrent la jadéite comme triclinique.

PYROXÈNES RHOMBIQUES

Sous la formule $RSiO^3$ se rangent plusieurs espèces de pyroxènes, où la magnésie l'emporte de beaucoup sur la chaux, en même temps que la symétrie est exactement rhombique. Ce sont : l'*Enstatite* $MgSiO^3$, la *Bronzite* (Mg, Fe) SiO^3, et l'*Hypersthène* (Fe, Mg) SiO^3. L'angle du prisme varie de 91 à 93 degrés. Dans ces conditions, et en respectant la règle d'après laquelle la plus petite des deux diagonales de la base rhombe doit être placée en avant, on a pour R. A., 0,971 : 1 : 0,570. Tel est en effet le rapport d'axes qui a été adopté par vom Rath et par Des Cloizeaux.

Toutefois, l'analogie des pyroxènes rhombiques avec ceux du système monoclinique ressort mieux si, rompant avec la tradition habituelle, on place la macrodiagonale en avant, comme a fait M. Tschermak, ce qui donne R. A. = 1,031 : 1 : 0,588. Dans ce cas, h^1 permute avec g^1. La face g^1 devient donc, pour les deux séries de pyroxènes, celle qui tronque l'angle obtus des clivages, et c'est aussi celle suivant laquelle s'effectue la division en lamelles, caractéristique de l'hypersthène, de la bronzite et de la diallage; division qui fait souvent alterner des lames minces de diallage et d'autres de bronzite.

Quoi qu'il en soit, nous nous en tiendrons à la notation habituelle, c'est-à-dire au premier rapport d'axes, qui place l'angle obtus en avant, correspondant aux arêtes *h*. Dans ce cas, $mm = 91°40'$ à $91°44'$. Le plan des axes optiques est g^1 (sauf dans les variétés dites *Protobastite* et *Diaclasite*, où les axes optiques passent dans h^1). Dans l'Enstatite, la bissectrice aiguë est n_g, perpendiculaire à p, avec $2V = 69°$ et $\rho > v$. Mais l'angle augmente avec la teneur en fer. Pour 10 °/₀ FeO (Bronzite), il devient de 90°. Au delà de cette limite, n_p est la bissectrice aiguë (Hypersthène) et 2V diminue quand la teneur en FeO s'élève, le sens de la dispersion autour de cette bissectrice étant $\rho > v$.

On peut adopter 5 pour 100 de FeO comme la limite de la teneur en fer de l'enstatite, et 12 pour celle de la bronzite. Les teneurs supérieures conviennent à l'hypersthène (1).

Enstatite. 57. SiO^2; 34 à 35. MgO; 3 à 5. FeO; 0,5 à 2,5. Al^2O^3; 1 à 2. H^2O. — P. S. = 3,10 à 3,29. — D. = 5,5.

$mm = 91°44'$; $e^2e^2 = 148°8'$ sur p. Formes usuelles : $m, h^1, g^1, e^2, e^{3}/_{2}, e^6, b^{3}/_{4}$, etc. Clivage facile suivant m; moins facile suivant g^1.

Opt. Réfr. positive. $n_g = 1,674$; $n_m = 1,669$; $n_p = 1,665$. Plaques minces incolores.

Éclat vitreux, nacré sur le clivage facile; blanc jaunâtre, grisâtre ou verdâtre. Presque infusible; inattaquable.

(1) Tschermak *in* Lacroix, *Minéralogie de la France*, I, p. 540.

Se trouve dans la serpentine, les gabbros, les norites, les péridotites, dans les gîtes d'apatite de Bamle et aussi comme élément constituant de la lherzolite des Pyrénées. Rencontrée également, à l'état très pur, dans les météorites.

Étym. : ἐνστάτης, adversaire, à cause de son infusibilité. On l'a aussi nommée *Protobastite*, parce qu'on la considère comme le minéral d'où dérive, par hydratation, la *Bastite* ou serpentine de la Baste (Hartz).

La **Bronzite** (P. S. = 3 à 3,5. D. = 4 à 5), remarquable par les reflets bronzés de ses lamelles, est une enstatite contenant jusqu'à 12 $^0/_0$ FeO, avec clivages m et g^1, le second parfait. Bien que son indice moyen soit le même que celui de l'enstatite et que les axes optiques soient également situés dans g^1, le signe optique, selon M. Tschermak, peut être aussi bien positif que négatif; en sorte que la Biss. serait normale, tantôt à p, tantôt à h^1. Polychroïsme faible.

A peine fusible, même en écailles minces; inattaquable.

Se trouve dans les Péridotites et les serpentines; alterne souvent, en lamelles allongées suivant g^1, avec des lamelles de diallage parallèles à h^1.

Hypersthène. P. S. = 3,3 à 3,4. — D. = 6.

Cette espèce est la plus riche en fer parmi celles du groupe des pyroxènes rhombiques. On y trouve 51. SiO^2; 11 à 21. MgO; 12 à 34. FeO, avec 2 à 3. CaO. Son prisme est de 91°40'. On a R. A = 1,029 : 1 : 0,587. Combinaison usuelle (au lac de Laach) : $mh^1g^1e^2a^1/_2\{b^1b^1/_5g^1/_2\}$; au Capucin, d'après Vom Rath : $mh^1g^1pe^2e^4b^1/_2a_3nx$, avec $n = (212) = \{b^1b^1/_3h^1/_2\}$ et $x = (232) = b^1b^1/_5g^1/_2$ (fig. 437); petits cristaux parfois aciculaires et même capillaires, allongés suivant l'axe vertical. Clivages; g^1 parfait, m assez net. Signe optique négatif; 2V = 50°. $n_g = 1,705$; $n_m = 1,702$; $n_p = 1,692$; fortement polychroïque en lames minces, dans les tons verts et bruns. Une lame de l'hypersthène du Labrador, parallèle à g^1, donne au dichroscope une image rouge hyacinthe et l'autre bleu verdâtre, noir grisâtre, verdâtre ou brunâtre.

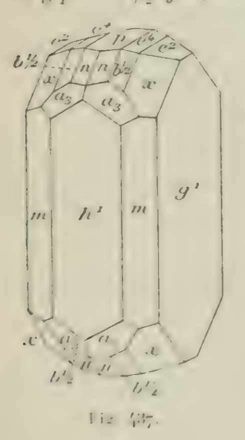


Fig. 437.

La couleur de l'hypersthène est le noir verdâtre ou le brun verdâtre. Une variété de cette espèce offre, sur le clivage facile g^1, des reflets métalliques d'un rouge de cuivre, dus sans doute à l'interposition de petites lamelles, peut-être de diallage.

Apre au toucher; très difficilement fusible sur les bords; inattaquable.

L'Hypersthène se trouve à l'île Saint-Paul (côte du Labrador), au lac de Laach, à l'île de Skye, et dans des *géodes* au Capucin (Mont-Dore), etc.; fait partie des hypérites, de certaines andésites et des diabases.

Étym : ὑπέρ, au-dessus, et σθένος, force, à cause de sa dureté.

AMPHIBOLES

Le groupe des amphiboles est remarquablement symétrique de celui des pyroxènes. Comme lui, il renferme des espèces rhombiques, d'autres, en plus grand nombre, monocliniques, et une triclinique. De la même façon, on y distingue, dans la série monoclinique, des espèces dépourvues d'alumine, d'autres alumineuses ou ferrifères, d'autres se faisant remarquer par la présence de la soude.

Dans toutes les amphiboles, il y a toujours au moins autant de magnésie que de chaux. La formule qui semble le mieux répondre aux analyses est $(Mg, Ca, Fe)^8Si^9O^{26}$. Mais il est préférable de laisser à chaque espèce une formule distincte.

Etym. : ἀμφίβολος, douteux.

AMPHIBOLES MONOCLINIQUES

L'angle du prisme *mm*, dans les amphiboles monocliniques, qui toutes sont holoédriques, varie entre 124° et 125°. Adoptant, avec Des Cloizeaux, $mm = 124°11'$ et $ph^1 = 104°58$, on a R. A. = 0,548 : 1 : 0,294 (1). Les autres angles sont : $b^1/_2 b^1/_2 = 148°28'$ (2); $pb^1/_2 = 145°35'$.

Le clivage est toujours parfait suivant *m*. Ce clivage se traduit, en plaques minces, par deux systèmes de fissures fines et nettes, qui, dans les sections normales à l'axe prismatique, se croisent sous un angle de 124 à 125° (fig. 438). Les plaques parallèles à cet axe n'offrent que des fissures parallèles (fig. 439), d'autant plus distinctes que la section est plus voisine de la situation normale au plan de clivage.

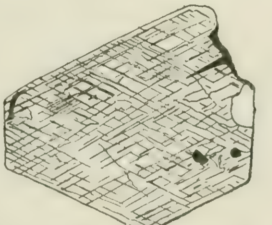


Fig. 438. — Section basique d'un cristal de hornblende. Grossissement : 36 diamètres. — D'après M. Rosenbusch.

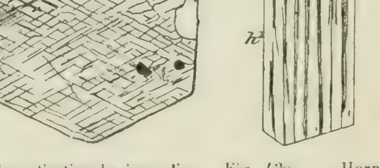


Fig. 439. — Hornblende coupée parallèlement à l'axe du prisme.

Le signe optique est le plus souvent négatif. L'angle 2V varie de 80° à 120° et l'indice moyen est compris entre 1,6 et 1,7. Les axes optiques sont dans g^1 et la Biss. est presque normale à h^1. La biréfringence moyenne atteint 0,025.

Amphiboles non alumineuses. — 1° **Trémolite.** La quantité de magnésie y

(1) M. Zirkel (12e édit.) donne R. A. = 0,5318 : 1 : 0,2936, avec $ph^1 = 75°10'$, ce qui conduit à $mm = 125°35'$ au lieu de 124°30', donné par le même auteur. Quant au rapport donné par M. Tschermak (0,5509 : 1 : 0,2937), il fournit bien, avec $ph^1 = 73°58'$, l'angle *mm*, admis par l'auteur, de 124°11'; mais la valeur de ph^1, ainsi donnée, est indiquée à tort comme venant de Des Cloizeaux, pour qui $ph^1 = 75°2'$. — (2) Comme on a $e^1e^1 = 148°16'$, certains cristaux peuvent être notés assez indifféremment $mh^1b^1/_2a^1$ ou mh^1e^1p.

égale au moins dix fois celle du fer. — P. S. = 2,9 à 3,2. — D. = 5,5. — 55 à 60. SiO^2; 24 à 28. MgO; 12 à 15. CaO; 0 à 3. FeO; 0 à 1,7. Al^2O^3.

Forme habituelle : le prisme *m* ou *mh*[1] sans terminaison ou avec e^1, avec clivage *m* très facile et très net. Réfr. négative; $\rho < v$; 2V = 80° à 88°. 2H = 100° à 101°. Biss. inclinée sur l'arête verticale de — 75°. $n_g = 1,634$ (jaune); $n_m = 1,623$; $n_p = 1,606$. Polychroïsme nul. Incolore, blanche, verdâtre, grise, facilement fusible; inattaquable.

Se trouve dans la dolomie, le calcaire saccharoïde, le micaschiste, les gîtes de fer, etc., souvent en masses bacillaires radiées, à éclat soyeux.

Étym. : Val Tremola, dans le massif du Saint-Gothard. On emploie souvent comme synonyme le nom de *Grammatite*.

La Trémolite, lorsqu'elle s'altère en s'hydratant, se divise en fibres flexibles, à éclat soyeux, capables de former, par leur enchevêtrement, de véritables *tissus minéraux*. Telle est l'*Asbeste* (ἄσβεστος, *inextinguible*), avec laquelle les anciens fabriquaient les mèches des lampes perpétuelles en usage dans les temples. La variété la plus flexible et la plus blanche d'asbeste est l'*Amiante* (ἀμίαντος, pur, sans souillure), ainsi nommée parce qu'elle est incombustible et que le feu lui restitue sa pureté. On tissait autrefois avec l'amiante une toile destinée à envelopper les corps qu'on livrait au bûcher. De nos jours, on en a fabriqué jusqu'à du papier susceptible de recevoir des caractères d'imprimerie. C'est l'amiante qui constitue les variétés dites *liège*, *cuir* et *carton de montagne*.

2° **Actinote.** — Isomorphe avec la trémolite, mais plus ferreuse; car elle peut contenir jusqu'à 12 ou 13 %. FeO, avec 22. MgO et 14. CaO. La transition est du reste continue entre les deux espèces. — P. S. = 2,8 à 3,3. — D. = 5 à 5,5.

Prisme *m*, rarement terminé par $b^1/_2$ ou e^1. Signe opt. négatif; $\rho < v$; 2V = 75° à 80°; $n_g = 1,636$; $n_m = 1,627$; $n_p = 1,611$. Biss. faisant avec l'arête *mm* un angle de — 75°. Polychroïsme sensible (n_g vert, n_m et n_p jaune pâle).

Vert bouteille, vert olive ou vert noirâtre, avec poussière blanc verdâtre, l'actinote fond au chalumeau avec un léger bouillonnement. Réact. 48. Elle est souvent rayonnée, d'où son nom d'*actinote*, tiré du grec et traduit en allemand par *Strahlstein*. On la trouve dans les schistes chloritiques, la serpentine, les gîtes de fer de Suède. On y peut rapporter les variétés vertes d'asbeste, notamment la **Byssolite** du Tyrol.

La variété de *Jade* appelée *Néphrite de Chine* est une trémolite ou une actinote compacte, d'un blanc verdâtre, d'une dureté de 6 à 6,5. Il en est de même de la *Néphrite de Sibérie*, où M. Damour a trouvé 55 à 56. MgO ; 14 à 15. CaO, avec 4 à 8. Al^2O^3 (P. S. = 3,08 à 3,02. — D. = 6,5). Ce jade, comme le *jade oriental* de la Chine, de l'Asie centrale et des îles du Pacifique, doit sa grande ténacité à l'enchevêtrement de fibres très fines. Mais ni l'un ni l'autre ne doivent

être confondus avec la *Jadéite*, dont il a été question plus haut (1) et dont ils se distinguent par leur bien moindre fusibilité, l'absence de la soude et une proportion beaucoup moins forte d'alumine.

La *Grunérite*, la *Cummingtonite*, la *Dannemorite*, la *Richtérite* complètent le groupe des amphiboles non alumineuses.

Amphiboles alumineuses ou ferrifères. — **Hornblende** (ancien nom allemand). Cette espèce contient jusqu'à 14 $^0/_0$ d'alumine. L'oxyde ferreux y varie de 7 à 29, la magnésie de 4 à 16, la chaux de 13 à 23 et on y compte de 0 à 10 d'oxyde ferrique, avec un peu de soude et de potasse. — P. S = 3 à 3,4. — D. = 5.5.

On distingue deux variétés de hornblende : la *Hornblende commune* et la *Hornblende basaltique* ou *Basaltine*.

La première, très rare en cristaux terminés, est généralement verte, quelquefois d'un brun foncé. Elle forme des individus plus ou moins nettement prismatiques, dans les roches basiques anciennes et dans les schistes cristallins. On lui rapporte d'ordinaire une variété fibreuse des diabases et des amphibolites, en fibres généralement parallèles et d'un vert clair; mais il se pourrait que cette variété, qui dérive d'une transformation de cristaux d'augite (*ouralitisation*) dût être rapportée à l'actinote (2).

Dans la Hornblende commune, on a 2V = 84°. La Biss. est négative et inclinée de — 75° à — 68° sur *mm*; n_g = 1,653; n_m = 1,642; n_p = 1,629. Le polychroïsme est marqué (n_g vert foncé, parfois bleuâtre; n_p jaune verdâtre à jaune clair). L'angle d'extinction des lamelles de clivage atteint et dépasse 13° relativement à *mm*.

La *Hornblende basaltique* forme des cristaux terminés, noirs comme ceux d'augite, mais plus brillants. Ils sont hexagonaux (et non octogonaux), par suite de la combinaison de *m* avec g^1. Enfin, au lieu du biseau incliné $b^1/_2 b^1/_2$ de l'augite, ils portent d'ordinaire un pointement triple $pb^1/_2$.

Combinaisons habituelles : $mg^1pb^1/_2$ (fig. 440); la même (fig. 441) avec $d^1/_2$, $e^1/_2$ et $x = (b^1/_2 d^1/_4 g^1/_4)$. Macles parallèles à h^1. Faces souvent inégales, arêtes arrondies et comme fondues. Éclat vitreux. Assez facilement fusible avec bouillonnement en verre ou en émail noir (avec la hornblende commune, vert ou jaunâtre). Réact. 48. Légèrement attaquable. Biss. négative, inclinée sur *mm* de — 90° à — 80°. 2V = 80°; n_g = 1,752; n_m = 1,725; n_p = 1,680. Polychroïsme

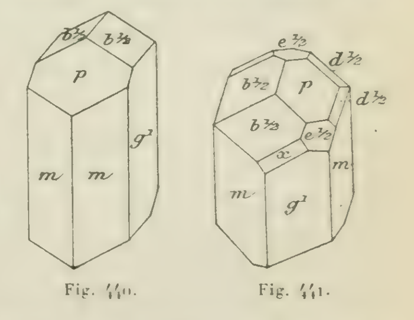


Fig. 440. Fig. 441.

(1) Voir plus haut, p. 498. — (2) Rosenbusch, *Mikr. Physiographie*, p. 467.

intense dans les tons bruns. L'angle d'extinction, relativement à *mm*, sur les lames de clivage, ne dépasse pas 13° et peut devenir nul.

La Basaltine est fréquente dans les basaltes et leurs tufs. Les blocs de la Somma en contiennent des cristaux assez riches en facettes, avec cannelures parallèles aux arêtes prismatiques.

La **Pargasite**, du calcaire saccharoïde de Pargas, est une hornblende commune d'un vert céladon qui, contrairement à toutes les autres espèces du groupe, possède un signe optique positif. A. O. dans g^1. $2V = 58°$ à 60°. Bissect. inclinée de + 18° à 21° sur l'arête *mm*. $n_g = 1,632$; $n_m = 1,620$; $n_p = 1,613$.

L'**Ouralite** offre les clivages *m* de l'amphibole avec les formes $mh^1 g^1 b^1/_2 a^1$ de l'augite. C'est le résultat d'une pseudomorphose, par suite de laquelle un cristal de pyroxène s'est trouvé remplacé par de petits prismes verts de hornblende ou d'actinote. De là le nom d'*ouralitisation*.

La *Smaragdite* vert d'herbe ou *Diallage verte* de l'euphotide de Corse et des éclogites est une hornblende commune en agrégats fibreux. L'*Edénite* est une hornblende claire qui contient moins de 5 °/₀ de fer.

AMPHIBOLES SODIFÈRES

Le groupe des amphiboles sodifères comprend une série d'espèces dont l'allongement habituel est *négatif*, tandis que celui des hornblendes est *positif*. La transition d'un groupe à l'autre se ferait par les *Katoforites* de M. Brögger.

La première des amphiboles sodifères est l'**Arfvedsonite** des syénites néphéliniques, espèce ferreuse, pauvre en alumine, avec clivages suivant les faces d'un prisme de 123°55'. — P. S. = 3,54 à 3,59. — D. = 6. Signe négatif : A. O. dans g^1 ; n_g fait avec l'axe vertical un angle de 75° dans l'angle obtus ph^1. Biréfringence de 0,021 à 0,027.

La **Crocidolite** peut être considérée comme une arfvedsonite sans chaux. P. S. — 3,2 à 3,3. Cette espèce, en fibres soyeuses asbestiformes, d'un bleu verdâtre chatoyant, veloûté sur les surfaces polies, accompagne les gîtes de fer de l'Afrique australe (où elle est parfois épigénisée par le quartz, donnant l'*œil de tigre* aux reflets jaunes). On la trouve aussi dans le porphyre micacé des Vosges. Biss. positive faisant avec l'axe vertical un angle de 69° à 73° dans l'angle obtus ph^1. Allongement négatif. Polychroïque.

La **Riebeckite**, sodifère et ferrifère, allongée suivant l'axe vertical, avec n_p à 5° de cet axe dans l'angle aigu ph^1, aurait, selon M. Lacroix, n_g pour bissectrice aiguë. Polychroïsme intense.

Le **Glaucophane**, en prismes d'un gris bleuâtre, des micaschistes de Syra et de ceux de l'île de Groix, est sodifère, très polychroïque, et, quoique de signe négatif, possède un allongement positif, seul caractère qui permette de le distinguer de la crocidolite (1).

(1) Lacroix, *Bull. Soc. minéralog.*, 9 janvier 1890.

P. S. = 3,1. — D. = 6 à 6,5 ; mm = 124°50′. Biss. n_p inclinée de 84° à 86° sur l'axe vertical dans l'angle aigu ph^1. Biréfringence : 0,02. Polychroïsme net : n_g bleu d'azur : n_p jaune pâle.

AMPHIBOLES RHOMBIQUES

Les amphiboles de symétrie rhombique sont l'*Anthophyllite* et la *Gédrite*. Ces deux espèces ne présentent d'autres formes géométriques déterminables que les faces du prisme, et leur symétrie n'a été établie que d'après les propriétés optiques. La première, riche en magnésium, est optiquement positive, tandis que la seconde, alumineuse et d'ordinaire plus ferreuse, est de signe négatif (exactement en parallélisme avec l'hypersthène).

Anthophyllite. $(Mg,Fe)SiO^3$. — P. S. = 3,06 à 3,13. — D. = 5,5 à 6. mm = 125°37′.

En masses fibreuses blondes ou brunes, difficilement fusibles, inattaquables; clivage facile m, moins facile h^1 et g^1. A. O. dans g^1. Biss. n_g parallèle à l'axe vertical. 2V voisin de 84°. $\rho < v$; $n_g = 1,657$; $n_m = 1,642$; $n_p = 1,633$. Polychroïsme insensible en lames minces.

La **Gédrite** des Pyrénées (Gèdre), du Groenland, de Snarum et de Bamle, isomorphe avec l'anthophyllite, mais contenant le silicate $(Mg,Fe)SiO^3$ mélangé avec $(Mg, Fe) Al^2SiO^6$, est brune ou blonde, difficilement fusible, et se présente en longues aiguilles entrecroisées, avec fer oxydulé et mica brun. Biss. n_p perpendiculaire à h^1. 2V = 78°.

Les deux amphiboles rhombiques sont des éléments habituels des schistes cristallins, notamment du gneiss à amphibole et des amphiboloschistes.

AMPHIBOLE TRICLINIQUE. — Il existe une amphibole triclinique (1); c'est l'**Ænigmatite** ou **Cossyrite**, de formule $Na^4Fe^9 (Al^2, Fe^2) (Si, Ti)^{12}O^{38}$ avec R. A. = 0,678 : 1 : 0,351. — P. S. = 3,74 à 3,85. — D = 5,55. — mm = 114°9′; ph^1 = 107°11′.

Opt. Signe positif. Biss. faisant avec l'axe vertical un angle voisin de 45° dans l'angle obtus ph^1. A. O. à peu près dans g^1. 2E = 60°.

Clivages m et t, moins faciles que pour les amphiboles. Noire; opaque, poussière brun rouge.

Polychroïsme intense. Facilement fusible; difficilement attaquable.

Renferme 38 à 43. SiO^2; 6 à 8. Fe^2O^3; 33 à 36. FeO; 7,5. TiO^2. etc.

Se trouve à Pantelleria (Cossyrite) dans une néphélinite d'Auvergne, et au Groënland, dans la syénite à éléolite.

Etym. : αἴνιγμα, énigme, à cause de sa nature problématique relativement à la *Kölbingite*, dont elle paraissait être une pseudomorphose (Breithaupt).

(1) Fœrstner *in* Lacroix, *Minéralogie de la France*, I, p. 708. Hintze, *Handbuch*, II, p. 1268.

Remarques sur la famille des pyroxènes et des amphiboles. — La grande analogie qui existe entre les pyroxènes et les amphiboles laisse pressentir que les formes cristallines des deux groupes doivent pouvoir être ramenées à un même type.

D'abord, en comparant le rapport d'axes des pyroxènes (1,0947 : 1 : 0,5915) et celui des amphiboles (0,548 : 1 : 0,294), on s'assure que, l'axe moyen restant le même, les deux autres axes ont, pour les pyroxènes, des paramètres juste égaux au double de ceux des amphiboles. D'après cela, si on double ces deux derniers paramètres, ce qui revient à donner au prisme m de l'amphibole la notation h^3, si, de plus, on donne à l'hémipyramide $b^1/_2$ la notation d^1 ; enfin si l'on affecte à l'ancienne base p du pyroxène la notation o^2, à l'hémidôme a^1 de la même espèce la notation a^2, on obtient, pour les rapports d'axes et la valeur de l'angle nouveau ph^1, les chiffres suivants, que nous écrivons au-dessous de ceux qui conviennent à l'enstatite, l'angle aigu de cette dernière étant en avant (1) :

Enstatite.	R.A =	1,031	: 1 :	0,588	ph^1 =	90°
Pyroxène.	—	1,0585	: 1 :	0,5942	—	89°38′
Amphibole	—	1,0581	: 1 :	0,5926	—	89°25′

C'est-à-dire que les deux derniers genres sont cristallographiquement identiques et très voisins de la symétrie rhombique de l'enstatite.

Cependant les clivages et la forme des cristaux demeurent distincts, ce que M. Tschermak attribue à la différence des polyèdres particulaires, différence que laisse pressentir l'examen des formules chimiques.

D'autre part, la trémolite fondue et cristallisant par refroidissement prend la forme du pyroxène, tandis que ce dernier, après fusion, conserve sa forme propre. En revanche, dans certaines roches à texture granitoïde, l'ouralitisation, ou changement de la substance de l'augite en celle de l'amphibole, est chose fréquente. On en peut inférer que, pour cette famille de silicates, l'état igné est représenté par le pyroxène, et celui de la voie humide par l'amphibole.

FAMILLE DU PÉRIDOT

GENRE PÉRIDOT

Cette famille, qui ne se compose que du seul genre *Péridot*, renferme des *orthosilicates* (2) magnésiens de formule $(Mg, Fe, Mn)^2SiO^4$, qui tous cristallisent dans le système rhombique avec les éléments suivants :

(1) Tschermak, *Lehrbuch*, 1re édit., p. 446. — (2) L'acide *orthosilicique* aurait pour formule $Si(OH)^4$.

R. A. = 0,586 : 1 : 0,466 ; $mm = 119°13'$; $pe^1 = 155°1'$: $e^1e^1 = 130°3'$ sur p ; $e^1/_2e^1/_2 = 94°4'$ sur p ; $g^3g^3 = 80°54'$ sur h^1 (1).

Opt. Signe positif. A. O. dans h^1. Biss. normale à p. $2V = 87°$; $2H = 104°$. $n_g = 1,967$; $n_m = 1,678$; $n_p = 1,661$; $\rho < v$.

Chrysolite. — P. S. = 3,3 à 3,4. — D. = 6,5 à 7. — 40. SiO^2, 50. MgO ; 9. FeO, avec de petites quantités d'oxydes d'Al, Mn, Ni.

Cristaux $h^1mg^3g^1$; $pe^1e^1/_2e^1/_3a^1b^1/_2e_3$; etc., avec clivage g^1 facile.

Vert jaunâtre ; éclat vitreux. Infusible ; après pulvérisation. Réact. 88.

L'espèce fournit une gemme peu estimée sous le nom de Péridot d'Orient.

Étym. : Le nom de *Chrysolithus* est usité dans Pline.

Olivine. C'est le *péridot granulaire* des basaltes, caractérisé par sa couleur, qui rappelle celle de l'huile d'olive. Sa composition ne diffère de celle de la Chrysolite que par un peu moins de magnésie et un peu plus (jusqu'à 16 °/₀) d'oxyde ferreux. Quand l'olivine est cristallisée, comme à Torre del Greco, les cristaux offrent la combinaison $h^1g^3g^1e^1e^1/_2a^1b^1/_2$ (fig. 442). Mais le plus souvent l'olivine est en grains engagés dans le basalte et ses tufs. Les conglomérats volcaniques de l'Auvergne renferment des boules d'olivine de la grosseur du poing, remarquables par leur état granulaire, fendillé en tous sens, leur éclat vitreux et la couleur variant du jaune au vert. A Espaly, les cristaux d'olivine, bruns et ternes, offrent la combinaison $g^1g^3e^1e^1/_2$ (fig. 443).

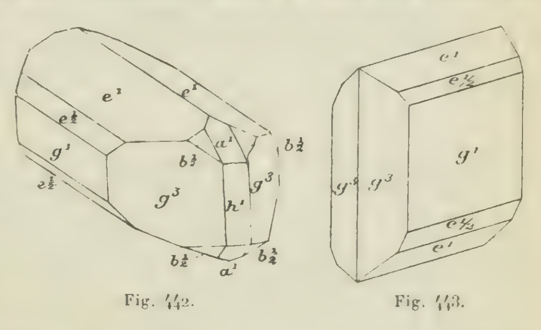


Fig. 442. Fig. 443.

Les divers caractères de l'olivine sont ceux de la chrysolite. Les cassures curvilignes y sont fréquentes (fig. 444). Cette espèce est remarquable par la facilité avec laquelle elle se transforme en serpentine (fig. 445).

Dans les plaques minces, l'olivine déploie des couleurs de polarisation très vives ; elle renferme des inclusions solides de fer oxydulé et des inclusions liquides d'acide carbonique.

L'olivine des roches basiques granitoïdes (diabases, norites, gabbros, péridotites) et des bombes volcaniques est en grains dépourvus de contours cristallins, avec inclusions de magnétite, ilménite, apatite. Elle appartient à des variétés peu ferreuses. Celle des mélaphyres, basaltes, leucitites, etc., est en

(1) Dans le *Manuel* Zirkel-Naumann, les faces que nous notons e^1 sont prises pour déterminer le prisme et deviennent m, tandis que h^1 se change en p et g^3 en $e^1/_2$.

grains cristallisés, mais dont la forme a été le plus souvent oblitérée après coup par corrosion du magma, qu'on voit pénétrer dans l'intérieur des grains. Les variétés ferreuses y abondent. Enfin dans les amphibolites, pyroxénites et éclogites, l'olivine, presque dépourvue d'inclusions de minerais de fer, offre, sous cette réserve, le même facies que dans les roches granitoïdes.

La **Forstérite**, complètement isomorphe avec l'olivine, est un péridot presque exclusivement magnésien (P. S. = 3,19 à 3,24. — D. = 7), trouvé au Vésuve.



Fig. 444. — Cristaux de péridot-olivine (2) dans un basalte, avec augite (1).

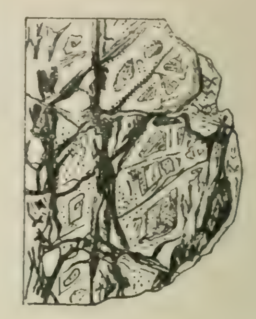


Fig. 445. — Cristal d'olivine en voie de serpentinisation. Grossissement : 57 diamètres. — D'après M. Rosenbusch.

L'**Hyalosidérite** est un péridot à 32 % MgO et 28. FeO, avec un peu de potasse et d'alumine. Elle fond au chalumeau en un globule noir magnétique. Cette espèce, rougeâtre, brunâtre, quelquefois jaune laiton ou irisée, forme des grains cristallins, terminés, dans la roche basaltique du Kaisersthul et dans la dolérite de Fribourg (Bade).

La **Fayalite** de Fayal (Açores) est un péridot ferreux, en masses cristallines, clivables dans deux directions rectangulaires, opaques, d'un noir de fer, à surface quelquefois brune et irisée. P. S. = 4 à 4,1. — D. = 6,5. Attirable à l'aimant. Facilement fusible en globule noir magnétique ; réaction du fer et du manganèse. Soluble en gelée dans les acides. L'analyse donne 30. SiO^2 ; 58. FeO ; 2,5. MnO, avec 3,5. Al^2O^3, un peu d'oxyde de cuivre et 2 à 3 de sulfure de fer.

Bissectrice négative, normale à g^1. Biréfringence, 0,043 à 0,049.

Dans la **Téphroïte**, le manganèse tient la place de la magnésie et du fer, tandis que la **Knébélite** est un péridot ferro-manganésien et que, dans la **Monticellite**, la chaux et la magnésie sont les bases dominantes (P. S. = 3,12. D. = 5 à 5,5. R. A. = 0,576 : 1 : 0,434).

La **Villarsite** de Traverselle, $H^2Mg^4Si^2O^9$, souvent considérée comme une variété de talc ou de serpentine, est un péridot fendillé dans tous les sens et en voie de transformation serpentineuse (1). P. S. = 2,98. S. rhombique. Prisme de 120°8′.

(1) Lacroix, *Bull. Soc. minér.*, X, p. 144.

DEUXIÈME CLASSE

SILICATES DES AMYGDALES

ZÉOLITES

Le remplissage des amygdales, dans les roches basiques vacuolaires, s'opère à l'aide d'une famille naturelle de silicates, qui figurent aussi parmi les dépôts des sources thermales et qu'on a groupés sous la dénomination de *Zéolites*. Cronstedt désignait ainsi, dès 1756, des substances qui se gonflent et bouillonnent (ζέω, bouillir) lorsqu'on les expose à la flamme du chalumeau. Les zéolites sont toutes hydratées (donnant, par suite, de l'eau dans le tube), et presque toutes aluminifères. Dans ce cas, si l'on fait abstraction de la proportion d'eau, les rapports d'oxygène sont les mêmes que dans la famille des feldspaths, c'est-à-dire 1 : 3 : 4 ; 1 : 3 : 6 ; 1 : 3 : 8 ; 1 : 3 : 9 ; 1 : 3 : 12.

Les protoxydes des zéolites sont la potasse, la soude, la chaux, la baryte. La couleur de ces minéraux est généralement blanche, leur densité variable de 2 à 2,5, leur dureté comprise entre 4 et 6 et ils sont parfaitement décomposables par les acides. M. Damour avait remarqué que la dessiccation à 100° ou dans une atmosphère très sèche enlevait à presque toutes les zéolites, réduites à la grosseur d'un pois, une notable partie de l'eau de combinaison. Par contre, placées dans un air saturé d'humidité, elles absorbaient de 4 à 12 °/₀ d'eau, qui s'évaporait par exposition à l'air libre. Depuis lors, M. G. Friedel a montré (1) que l'eau de toutes les zéolites peut être totalement chassée sans que le réseau cristallin soit détruit. Non seulement cette eau est susceptible d'être reprise, mais on y peut substituer divers gaz ou des composés volatils du silicium.

ZÉOLITES SODIQUES

Mésotype. $H^4Na^2Al^2Si^3O^{12}$. — P. S. = 2,17 à 2,26. — D. = 5 à 5,5.

S. rhombique. R. A. = 0,983 : 1 : 0,352 ; mm = 91° ; $b^1/_2 b^1/_2$ adj. = 142°40 et 143°20′.

47 à 48. SiO^2 ; 25 à 27. Al^2O^3 ; 15 à 16. Na^2O ; 9,5. H^2O.

Combinaisons habituelles : $mb^1/_2$ ($mb^1/_2$ = 116°40′) ; $mb^1/_2x$ (fig. 446, avec $x = \{b^1 b^1/_{21} h^1/_{11}\}$ et xx = 146°28′ avant ; $mg^1b^1/_2$; $mh^1g^1b^1/_2$, etc. — Clivage m parfait. Allongement très net suivant h^1g^1.

(1) *Bull. Soc. minér.*, XIX, p. 93.

Cassure conchoïdale ou inégale ; éclat vitreux, incolore, blanche grise.

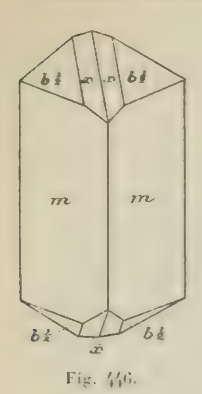


Fig. 446.

Opt. — A. O. dans g^1. Signe positif. Biss. perpendiculaire à p ; $\rho < v$. — $n_g = 1,4887$ (rouge) ; $n_m = 1,4797$; $n_p = 1,4768$. — $2V = 59°29'$; $2E = 94°27'$.

Ch. Se gonfle et fond en verre incolore ou verdâtre, quelquefois à la flamme simple de la bougie et sans qu'il soit besoin de souffler. Réact. 88.

En petits prismes hyalins ou d'un blanc laiteux, tapissant des géodes dans les roches volcaniques (Auvergne) ou en rognons bacillaires et fibreux, à texture très nettement rayonnée. La *Natrolite* (ou pierre de soude), en masses fibro-compactes jaunes, composées de noyaux sphéroïdaux radiés, est remarquable dans le Högau (Wurtemberg). La *Radiolite* de Brevig a la même structure.

Etym. : Le nom de mésotype a été créé par Haüy, qui considérait les formes de cette espèce comme *intermédiaires* (μέσος) entre celles de la Stilbite et celles de l'Analcime.

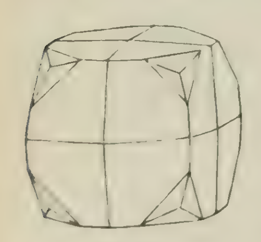
ZÉOLITES SODICO-CALCIQUES

Analcime. $H^4(Na^2, Ca)$, $Al^2Si^4O^{14}$. — P. S. = 2,22 à 2,29. — D. = 5,5.

S. cubique (en apparence).

57. SiO^2 ; 22 à 24. Al^2O^3 ; 12 à 14. Na^2O ; 0 à 6. CaO ; 8 à 9. H^2O.

Combinaisons habituelles : le trapézoèdre a^2, très fréquent ; pa^2 ; a^2a^r, ce dernier symbole appartenant à un trapézoèdre très surbaissé (fig. 447) Clivage p imparfait. Éclat vitreux, parfois nacré ; incolore, blanche, blanc rougeâtre, rouge de chair.


Fig 447.

Ch. Blanchit, se gonfle et fond ; avant calcination, facilement attaquable en abandonnant de la silice floconneuse ou gélatineuse. Indice = 1,4874 (rouge).

L'analcime se présente en gros cristaux trapézoédriques dans les tufs mélaphyriques du Tyrol méridional. On la trouve aussi aux îles Cyclopes, en petits cristaux hyalins, en Auvergne, à Staffa, en Irlande, au Lac Supérieur, etc. La variété de l'Oural, pourvue d'un clivage cubique assez net, a reçu les noms de *Cubizite* et de *Cuboïte*

La *Picranalcime* de Toscane est une Analcime magnésifère (10 %. MgO), sans chaux et avec 0,45. Na^2O, qui affecte les formes a^2 et pa^2.

Etym. : ἄναλκις, impuissant, parce que ce minéral est peu susceptible de s'électriser par frottement.

L'analcime offre des phénomènes de polarisation que divers auteurs ont

cherché à expliquer par des tensions intérieures, tandis que Mallard y a vu des groupements de 24 cristaux à symétrie rhombique pseudo quadratique. M. Bertrand (1) a fait voir que six prismes quadratiques, couronnés par des octaèdres b^1, tels que b^1b^1 opposés = 90°, peuvent se grouper autour d'un point, en s'accolant parallèlement à b^1, suivant trois directions rectangulaires et occuper tout l'espace, de façon à présenter extérieurement la forme du trapézoèdre a^2, les faces de ce pseudo-trapézoèdre étant formées par les faces a^2 des cristaux prismatiques. D'ailleurs l'analcime de Monte-Catini, en lames normales aux axes ternaires du trapézoèdre, donne la croix et les anneaux d'un cristal uniaxe.

L'analcime se distingue de la leucite en ce que, par la calcination, elle devient opaque en dégageant de l'eau.

L'**Eudnophite** est une zéolite très voisine, par sa composition, de l'analcime, mais rhombique, avec mm = 120°; R. A. = 0,577 : 1 : 0,640. — P. S. = 2,27. Biréfringence = 0,004. A l'état secondaire dans la syénite de Norvège.

Gmélinite. $H^{12}(Na^2.Ca)\,Al^2Si^4O^{18}$. — P. S. = 2,04 à 2,12. — D. = 4,5.

S. rhomboédrique; R. A. = 1 : 0,7254; pp = 112°26′.

La Gmélinite (dédiée à Gmelin), qui renferme de 4 à 7 °/₀ de soude pour 3 à 5 de chaux, avec 20 à 22 °/₀ d'eau, offre souvent la combinaison $e^2a^1pe^1/_2$, avec clivage e^2. Elle tapisse des cavités dans des wackes du Vicentin, de l'Irlande, de l'île de Chypre.

Signe optique variable; indice = 1,46; biréfringence = 0,001.

Dans la **Faujasite** (dédiée à Faujas de Saint-Fond), on compte de 4 à 5 °/₀ de soude et autant de chaux, avec 22 à 28 d'eau. La forme paraît être l'octaèdre a^1 du système cubique. — P. S. = 1,92. — D. = 5 à 6.

Thomsonite. $H^{12}(Ca,Na^2)^2Al^4Si^4O^{24}$. — P. S. = 2,31 à 2,38. — D. = 5 à 5,5.

S. rhombique; R. A. = 0,992 : 1 : 1,009 (2); mm = 90°25.

37 à 39. SiO^2; 30. Al^2O^3; 12 à 14. CaO; 4 à 8. Na^2O; 11 à 14. H^2O.

Clivages : g^1 parfait; h^1 moins parfait.

Éclat vitreux, incolore, blanche; se gonfle et fond au chalumeau en émail blanc. On en distingue deux variétés; 1° la *Thomsonite* proprement dite, en longues baguettes cannelées, $mh^1\,g^1\,pa^1$, $mh^1\,g^1\,pa^1/_3\,a^1/_6$, du trapp d'Écosse. 2° la *Comptonite*, en groupes sphéroïdaux ou en prismes courts, $mh^1g^1e^{60}$, des basaltes de Bohême.

(1) *Bull. Soc. minéral. de France*, 1881, p. 62. — (2) Rapport d'axes choisi de manière à mettre en évidence la symétrie pseudo-cubique (Lacroix).

Opt. Signe positif. A. O. dans p. Biss. normale à g^1 ; $2V = 53^\circ$; $n_g = 1,525$ (rouge ; $n_m = 1,503$; $n_p = 1,498$. $\rho < v$.

Dédiée au chimiste Thomson.

La **Mésole** ou **Féroëlite** des îles Feroë est une thomsonite à 42 ou 43 % de silice, groupée en sphérolithes à éléments très fins. La **Scoulérite** ou pierre de pipe de l'Amérique du Nord est une variété impure de Thomsonite.

Mésolite. $H^6(Ca,Na^2)Al^2Si^3O^{13}$. — P. = S. 2,18 à 2,39. — D. = 5,5.

La mésolite (que quelques auteurs considèrent comme un mélange isomorphe de mésotype avec une zéolite calcifère, la Scolésite) est triclinique, avec formes voisines de celles de la mésotype ; $mt = 91^\circ 45'$. Clivages m et t parfaits.

L'espèce contient 10 % de chaux et 4 de soude.

Signe opt. positif. Biss. sensiblement normale à h^1. A. O. dans un plan voisin de g^1 ; $2V = 35^\circ$; $\rho > v$. Allongement tantôt positif, tantôt négatif.

Gonfle et se tord au chalumeau. Le plus souvent en aiguilles, accolées en masses divergentes et implantées sur d'autres zéolites.

M. Lacroix réserve le nom de mésolite à l'espèce triclinique et range dans la Scolésite les minéraux sodico-calciques à signe optique négatif.

La **Pectolite**, $(Ca,Na^2,H^2)SiO^3$, des amygdaloïdes et des mélaphyres, est une zéolite peu hydratée, fusible sans bouillonnement et contenant 34 % de chaux avec 9 % de soude. Complètement isomorphe avec la Wollastonite, elle est optiquement positive, avec Biss. normale à g^1 ; $2V = 60^\circ$; biréfringence égale à 0,038.

ZÉOLITES CALCICO-POTASSIQUES

Christianite. $H^8(K^2,Ca)Al^2Si^4O^{16}$. — P. S. = 2,15 à 2,20. — D. = 4,5.

La Christianite, en raison de la forme de ses cristaux (fig. 448), a longtemps été regardée comme rhombique, avec $mm = 111^\circ 15'$. Mais diverses considérations, notamment celle des propriétés optiques, l'ont fait restituer au système monoclinique. Habituellement les auteurs admettent que les cristaux de la figure 448 sont essentiellement formés par les faces m, inclinées l'une sur l'autre d'à peu près 120° et associées à la base p ainsi qu'au plan de symétrie g^1. (R. A. = 0,702 : 1 : 1,22 ; $mm = 120^\circ 6'$; $ph^1 = 124^\circ 49'$).

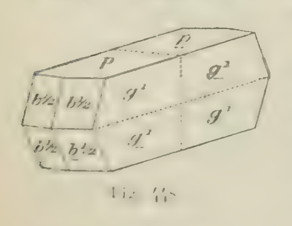


Fig. 448.

Cependant la Christianite offre des groupements par pénétration très curieux, comme la double macle cruciforme de Stempel (fig. 449), laquelle est symé-

trique relativement à trois axes rectangulaires et accuse, par suite, une sorte de symétrie cubique. Or Mallard a montré que si, gardant les faces p et g^1, on considère les faces mm comme représentant l'hémipyramide $b^1/_2$, les valeurs respectives des trois axes sont voisines, comme le montre la formule ci-dessus, du R. A. $= 0,707 : 1 : 1$, en même temps que les inclinaisons mutuelles de ces axes sont très rapprochées de 90°. Mais le rapport $0,707 : 1 : 1$ est le même que celui de $\frac{\sqrt{2}}{2} : 1 : 1$ ou $1 : \sqrt{2} : \sqrt{2}$, soit justement le rapport d'un axe quaternaire du cube aux deux axes binaires qui lui sont normaux.

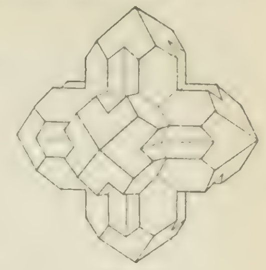


Fig. 449.

Dès lors on comprend bien les groupements de l'espèce ; d'abord celui de la figure 448, où deux cristaux $pg^1b^1/_2$ se pénètrent mutuellement, l'un d'eux formé par une hémitropie du premier autour de l'axe pseudo-binaire normal à p ; ensuite la macle cruciforme de Marburg (fig. 450), où un individu composé conformément à la loi précédente est groupé avec un autre, qu'on obtient en faisant tourner le premier de 90° autour de l'axe pseudo-quaternaire qui serait normal à h^1 ; enfin la double macle en croix de la figure 449, où les trois lignes de symétrie marquent les trois positions prises par l'axe pseudo-quaternaire pour reconstituer une symétrie cubique.

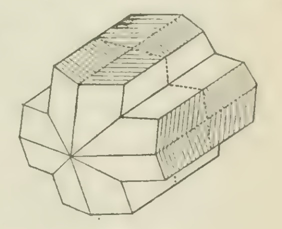


Fig. 450.

Les faces terminales des composants de la macle triple font entre elles des angles tels que si, comme dans les cristaux de Stempel, elles sont développées de manière à faire disparaître les angles rentrants, il en résulte un solide tout à fait semblable au rhombododécaèdre. En effet, on a en même temps $b^1/_2\ b^1/_2 = 120°$ et $pb^1/_2 = 120°$.

Clivages p et g^1. Signe opt. positif. Plan A. O. normal à g^1. Biss. n_g faisant avec p, dans l'angle aigu ph^1, 11° à 30°. Angle vrai des axes variant de 62° à 80° : 2H = 65° à 84°. Indice moyen = 1,51. Biréfringence : 0,003.

Gonfle et fond difficilement au chalumeau en verre bulleux. Réact. 88. La variété *Phillipsite*, plus riche en potasse, se rencontre en Italie, tandis que la Christianite proprement dite est connue à Marburg, en Auvergne, etc.

Étym. : Dédiée à Christian VIII de Danemark. L'espèce est souvent décrite sous le nom de *Phillipsite*, en l'honneur du minéralogiste anglais Phillips. C'est aussi l'*harmotome calcaire* des Allemands.

Gismondine. $H^8(Ca,K^2)Al^2Si^4O^{16}$. — P.S. = 2.26. — D. = 4,5.

S. quadratique (ou pseudoquadratique) ; $b^1b^1 = 92°30'$ sur p.
L'analyse donne 13 %. CaO ; 3. K^2O et 21. H^2O.

Cristaux plus ou moins distincts, en octaèdres pseudoquadratiques, résultant d'une macle de dômes monocliniques e^1 ; blancs et vitreux, associés à des cristaux de Christianite, dans une lave de Capo di Bove. Signe négatif. $2V = 40°$. A.O. dans g^1. Biréfringence : 0,008.

Étym. : Dédiée à Gismondi.

Apophyllite. $H^2(Ca,K^2)Si^2O^6 + H^2O$ ou, suivant M. Tschermak, $(H^2,K^2)^2CaSi^2O^7$. — P. S. = 2,35 à 2,39. — D. = 4,5 à 5.

S. quadratique (en apparence), avec R. A. = 1 : 1,77. En réalité monoclinique. 53. SiO^2; 25. CaO; 5 à 6. K^2O; 15 à 17. H^2O.

Bien que l'Apophyllite ne contienne pas d'alumine, elle a les mêmes propriétés au chalumeau et le même mode de gisement que les Zéolites, dont nous ne croyons pas devoir la séparer.

Combinaisons : *mp* ; *ma*^{1} ; *mpa*^{1} ; a^1a^1 adj. = 104°3′ ; a^1a^1 sur p = 58°45′. Les faces p sont ordinairement assez étendues pour donner aux cristaux un aspect tabulaire. Clivage p parfait.

Éclat vitreux ; nacré sur p : incolore, blanche, jaune, bleue, rose, vert pâle. Anomalies optiques, accusant un signe variable, n_e = 1,533 ; n_o = 1,531.

Ch. S'exfolie et fond avec bouillonnement en émail blanc bulleux. Réact. 89.

En cristaux dans les amygdaloïdes et aussi dans certains filons de plomb.

Les cristaux d'apophyllite sont depuis longtemps connus pour les phénomènes de polarisation que présentent les plaques parallèles à p, et que Biot attribuait à leur structure lamellaire. Dans les plaques épaisses parallèles à m, la lumière polarisée fait naître une série de teintes, offrant l'aspect d'une marqueterie (d'où le nom de *Tessélite*).

Étym. : ἀποφυλλίζειν, s'exfolier.

ZÉOLITES A BASE DE CHAUX, POTASSE ET SOUDE

Chabasie. $H^{12}(Ca,Na^2,K^2)Al^2Si^4O^{18}$. — P.S. = 2,08 à 2,17. — D. = 4 à 4,5.

S. rhomboédrique (en apparence). R.A. = 1 : 1,0858 ; pp = 94°46′.

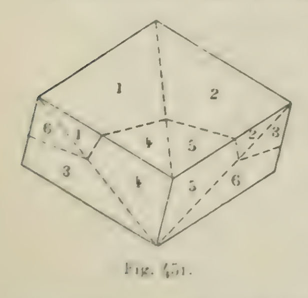


Fig. 451.

47 à 52. SiO^2; 17 à 20. Al^2O^3; 5 à 10. CaO ; 1 à 4. Na^2O ; 0,2 à 3. K^2O; 18 à 21. H^2O. M. Tschermak représente cette composition par le mélange isomorphe de deux silicates, $CaAl^2Si^6O^{16}$ et $H^8CaAl^2Si^2O^{12}$.

Combinaisons : p ; pb^1 ; pe^2 ; pb^1e^1, etc. Macles fréquentes ; un cristal, d'apparence rhomboédrique, est souvent formé de six portions distinctes (fig. 451). D'après M. Becke, six individus tricliniques s'assemblent par les faces m et t^1, tournant au dehors les faces p ou h^1. Également

macle par pénétration de deux rhomboèdres d'apparence presque cubique. Clivage p net. Double réfraction très faible. Éclat vitreux, incolore, blanche, rose, rougeâtre. Signe optique négatif. $n_m = 1,48$. Biréfringence : 0,003.

Ch. Bouillonne et fond. Réact. 88.

Les cristaux de Chabasie tapissent d'ordinaire des fentes ou des cavités dans les amygdaloïdes et aussi dans la syénite (Tyrol).

Étym. : Chabasie est l'ancien nom d'un minéral.

La *Phacolite* est une Chabasie en cristaux lenticulaires maclés, formés des faces e^1 et b^1.

Stilbite. $H^{12}(Ca,Na^2,K^2)Al^2Si^6O^{22}$. — P.S. = 2,09 à 2,2. — D. = 3, 5 à 4.

55 à 58. SiO^2; 16 à 18. Al^2O^3; 5 à 9. CaO; 0 à 2. Na^2O; 0 à 0,6. K^2O; 17 à 19. H^2O. Longtemps considérée comme rhombique, avec R. A. = 0,928 : 1 : 0,756; $pb^1/_2 = 132°$, la Stilbite serait en réalité monoclinique. R. A. = 0,762 : 1 : 1,194; $mm = 118°50'$; $ph^1 = 129°10'$.

Combinaisons (dans l'hypothèse rhombique) : $h^1g^1b^1/_2$ (fig. 452); $h^1g^1pb^1/_2$; $mh^1g^1pb^1/_2$, etc. Dans le cas de l'hypothèse monoclinique, $b^1/_2$ se transforme en m, h^2 en p, p en a^1, et m en e^1; g^1 reste le même; h^1 et g^1 striées suivant h^1g^1; clivage g^1 parfait et très facile. Cristaux souvent aplatis parallèlement à g^1 et allongés suivant h^1g^1.

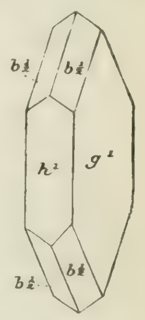


Fig. 452.

Opt. Signe négatif. Biss. normale à a^1 (monoclin.) AO. dans g^1; 2V = 22°; $\rho < v$; $n_g = 1,500$; $n^m = 1,498$; $n_p = 1,494$. Se boursoufle fortement au chalumeau avant de fondre. Réact. 89.

Les cristaux sont ordinairement groupés à plusieurs en forme de gerbes (*Desmine*). Leur éclat est vitreux, nacré sur g^1. Couleur blanche, rouge de chair, rouge foncé, brune.

La *Sphérostilbite* est une variété en globules radiés, à éclat nacré, dont l'intérieur raye le verre, tandis que la surface se raye à l'ongle, et qui tapissent des cristaux de stilbite.

Étym. : στίλβω, je brille. Quelquefois appelée *Desmine*, de δέσμη, faisceau. Ce dernier nom prévaut en Allemagne, où le nom de Stilbite est appliqué à la Heulandite, que nous allons décrire.

La *Puflérite* est une variété sphérolithique de stilbite, à éléments allongés suivant h^1g^1.

Heulandite. $H^{10}(Ca,Na^2,K^2)Al^2Si^6O^{21}$. — P. S. = 2,18 à 2,26. — D. = 3,5 à 4.

S. monoclinique : R. A. = 0,403 : 1 : 0,858. $mm = 136°4'$; $ph^1 = 91°26'$; $mg^1 = 111°58'$.

56 à 60. SiO^2; 15 à 17. Al^2O^3; 5 à 7. CaO; 1. Na^2O; 2. K^2O; 14 à 17. H^2O.

Combinaisons : $g^1po^1a^1$; $mg^1po^1a^1b^1$; la même avec e^1(fig. 453). $po^1 = 116°20'$;

$pa^1 = 114°$; $pe^1 = 139°22'$. Clivage g^1 parfait. Dispersion croisée des plus marquées. A.O. le plus souvent dans p ; Biss. positive, perpendiculaire à g^1 ; par la chaleur, n_p et n_m permutent. 2V variable de 0° à 60° ; $n = 1,505$; $n_m = 1,499$; $n_p = 1.498$. Éclat vitreux, fortement nacré sur g^1. Incolore, blanche, rouge, fragile. Au chalumeau, blanchit, se gonfle et fond en émail blanc. Réact. 89.

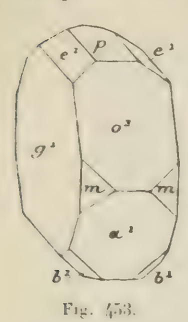


Fig. 453.

Souvent associée à la stilbite, avec laquelle elle avait d'abord été confondue (c'est la Stilbite de Naumann-Zirkel).

Les variétés d'un rouge brique, connues dans les géodes des trapps d'Écosse, paraissent devoir leur couleur à des écailles de Goethite.

Étym. : Dédiée à M. Heuland.

L'**Épistilbite**, très voisine par sa composition de la Heulandite, cristallise en prisme monoclinique de 135°10', avec groupements compliqués, produisant une symétrie extérieure rhombique. Elle est un peu plus dure (4,5) que la Heulandite. — R.A. = 0,413 : 1 : 0,870 ; $ph^1 = 90°$. Signe opt. négatif. Biss. inclinée de 81° sur mm ; $\rho < v$. A. O. dans g^1. 2V = 44°. $n_g = 1,512$; $n_m = 1,510$; $n_p = 1,502$.

Lévyne. $H^{10}(Ca.Na^2,K^2)Al^2Si^3O^{15}$. — P.S. = 2,1 à 2,2. — D. = 4. — S. rhomboédrique. R.A. = 1 : 0,836 ; $pp = 107°3'$.

Cette espèce, où 8 à 10 % de chaux sont associés avec 1,5 à 5 de soude, 0,5 à 1,5 de potasse, enfin 18 à 21 d'eau, présente d'ordinaire la combinaison a^1pe^1, avec macles de pénétration par rotation de 180° autour de l'axe ternaire. Les petits cristaux sont fortement aplatis suivant a^1. La *Mésoline* en est une variété grenue. Signe opt. négatif. Biréfringence : 0,002.

Étym. : Dédiée au minéralogiste Lévy.

ZÉOLITES CALCIFÈRES

Scolésite. $H^6CaAl^2Si^3O^{13}$. — P.S. = 2,2 à 2,3. D. = 5 à 5,5.

S. monoclinique. R.A. = 0,977 : 1 : 0,339 ; $mm = 91°22'$; $ph^1 = 91°10'$.

46 à 48. SiO^2 ; 24 à 27. Al^2O^3 ; 10 à 13. CaO ; 13 à 14. H^2O.

Clivage m parfait ; cristaux toujours maclés ; éclat vitreux très vif ; incolore, blanche : pyroélectrique. Réact. 88.

Opt. Signe négatif. Biss. dans g^1, faisant avec l'arête verticale, dans l'angle obtus ph^1, un angle de 15° ; A.O. dans un plan normal à g^1 ; 2V = 36° ; $n_m = 1,502$; biréfringence : 0,008.

En masses bacillaires radiées, dans les amygdaloïdes d'Écosse, d'Islande, etc.

Étym. : σκώληξ, ver, parce qu'elle se tord sous le feu du chalumeau.

L'**Okénite** ou *Dysclasite* est encore une zéolite, à 27 °/₀ de chaux et 18 °/₀ d'eau, sans alumine ($H^4CaSi^2O^7$).

S. rhombique; *mm* = 122°10'. Signe opt. négatif; indice moyen : 1,556; biréfringence : 0,009.

Il existe une variété asbestiforme d'Okénite, qui n'est rien autre chose qu'une Wollastonite altérée.

Laumontite. $H^8CaAl^2Si^4O^{16}$. — P.S. = 2,28 à 2,41. — D = 3 à 3,5.

S. monoclinique; R.A. = 1,146 : 1 : 0,590; *mm* = 86°16'; ph^1 = 111°14'; *pm* = 104°20'.

Cette espèce, qui contient 10 à 12 °/₀ de chaux et 12 à 15 d'eau, possède un clivage parfait g^1, à éclat nacré. Elle est remarquable par la facilité avec laquelle elle tombe en poussière à l'air, en abandonnant de 1 à 2 °/₀ d'eau. A.O. dans g^1; 2V = 30°; signe négatif : Biss. inclinée sur l'axe vertical de 60° à 65° dans l'angle obtus ph^1; n_g = 1,525; n_m = 1,524; n_p = 1,513.

Ch. Bouillonne et fond. Réact. 88.

Découverte par Gillet-Laumont dans les mines du Huelgoat (Bretagne), la Laumontite ou *Laumonite* a été retrouvée depuis dans un grand nombre de localités.

Prehnite. $H^2Ca^2Al^2Si^3O^{12}$. — P.S. = 2,8 à 2,95. — D. = 6 à 7.

S. rhombique; R. A. = 0,840 : 1 : 0,844; *mm* = 99°56'; pa^1 = 134°52'.

Cette espèce renferme 4 à 6 °/₀ d'eau, qu'elle ne dégage qu'à une température supérieure à celle de la flamme à alcool. Elle se gonfle avant de se fondre sous l'action du chalumeau. On la rencontre, soit en cristaux *pm*, aplatis suivant *p* (*Coupholite*), avec les faces $pg^1mh^1b^1/_2a^1a^2$, soit en mamelons et rognons ou gerbes verdâtres, à éclat vitreux, avec clivage *p* distinct. Elle est pyroélectrique et difficilement attaquable avant calcination.

Opt. — Signe positif; Biss. normale à *p*; A.O. dans g^1; 2V = 66° (jaune); n_g = 1,649; n_m = 1,626; n_p = 1,616. $\rho > v$, parfois l'inverse.

Bien que la prehnite soit rhombique, elle a ses cristaux groupés de manière à présenter anomalement une dispersion tournante (1).

D'autre part, Mallard a fait remarquer que, le paramètre de la brachydiagonale étant sensiblement égal à celui de l'axe vertical, ce qui fait de la macrodiagonale un axe pseudoquadratique, le rapport de la brachydiagonale à la moitié de la macrodiagonale est 1,68, chiffre peu éloigné de 1,73 ou $\sqrt{3}$. L'axe vertical serait donc pseudosénaire. Ainsi pourraient s'expliquer les

(1) Des Cloizeaux, *Bull. Soc. minér.*, 1882, p. 130.

nombreuses anomalies optiques de la prehnite, causées par des groupements que produiraient : 1° des rotations de 90° autour de la macrodiagonale; 2° des rotations de 60° autour de l'axe vertical.

Etym. : Dédiée à Prehn, qui la découvrit au Cap de Bonne-Espérance.

On la trouve aussi dans l'Oisans, au Tyrol, en Écosse, aux Pyrénées (Piquette déras lids). Si, par quelques caractères, elle s'éloigne des zéolites, c'est du moins un minéral de druses.

Datolite. $H^2Ca^2B^2Si^2O^{10}$. — P.S. = 2,8 à 3. — D. = 5,5.

S. monoclinique; R.A. = 0,633 : 1 : 0,636; mm = 115°21′; ph^1 = 90°9′; po^1 = 134°53′; pe^1 = 128°9′ (1).

La Datolite est un silico-borate hydraté de chaux, exclusivement drusique, qui fond avec bouillonnement au chalumeau et se trouve, soit dans les amygdaloïdes, soit dans certains filons en compagnie de prehnite et d'apophyllite. Pour ces différentes raisons, nous croyons devoir l'incorporer à la famille zéolitique. Les cristaux, très variés de formes et généralement prismatiques ($pmh^1g^3o^1e^1$), sont vitreux et offrent souvent des teintes verdâtres, violettes, rougeâtres. Clivage h^1 net. La Datolite de filons perd sa transparence à l'air et devient friable. Réact. 88.

Opt. A. O. dans g^1. Biss. négative, presque normale à p, faisant, dans l'angle aigu ph^1, un angle d'environ 4° avec h^1g^1; 2V = 74°25; $\rho > v$; $n_g = 1,670$ (jaune); $n_m = 1,654$; $n_p = 1,626$.

Etym. : δατέομαι, diviser, à cause de la structure granulaire de la variété massive.

La **Homilite** de la syénite éléolitique est une datolite ferreuse, isomorphe avec la datolite (P. S. = 3,28 à 3,34), de signe positif, avec plan A. O. normal à g^1. Biss. sensiblement parallèle à h^1g^1; 2V = 63°. Indice : 1,678. Biréfringence : 0,021.

ZÉOLITES BARYTIQUES

Edingtonite. $H^6BaAl^2Si^3O^{13}$. — P. S. = 2,69 à 2,71. — D. = 4 à 4,5.

S. quadratique; R. A. = 1 : 1,35 (2); mb^1 = 133°34′; b^1b^1 adj. = 92°41′.

L'Edingtonite, en cristaux très petits, manifestant l'hémiédrie sphénoédrique, avec clivage m, est blanche, de signe optique négatif et fond difficilement au chalumeau. Elle contient 27 °/₀ de baryte et 12 à 15 d'eau. Réact. 88.

On la trouve en Écosse, avec analcime et harmotome.

(1) Pour faire ressortir l'isomorphisme de la Datolite avec l'Euclase, M. Lacroix adopte R. A. = 1,264 : 1 : 0,635; d'où mm = 76°38′; ph^1 = 90°6′; pe^1 = 147°52′. La combinaison usuelle devient alors $pmh^1h^3e^1/_2$. — (2) Ce rapport diffère peu de 1 : 1,41, soit 1 : $\sqrt{2}$. M. Zirkel donne 1 : 0,6747, ce qui transforme b^1 en $b^1/_2$.

Harmotome. $H^{10}(Ba,K^2)Al^2Si^5O^{19}$. — P. S. = 2,44 à 2,50. — D. = 4,5.

46 à 48. SiO^2; 16 à 17. Al^2O^3; 20 à 21. BaO; 13 à 15. H^2O, avec 2 de Na^2O et K^2O.

L'*harmotome barytique* a exactement la même forme cristalline que la Christianite ou harmotome calcaire, dont elle reproduit toutes les combinaisons, notamment celles des figures 448 (*Morvénite* d'Écosse) et 450 (variété d'Andreasberg); mais on n'y retrouve pas la double macle cruciforme de la figure 449.

Clivages : g^1 facile et assez net; p moins facile. Plan A. O. perpendiculaire à g^1 et faisant, avec une normale à p, un angle de 25° à 27°40'. Signe opt. positif. Biss. normale à g^1; 2V = 86°; $n_g = 1,508$; $n_m = 1,506$; $n_p = 1,503$.

Éclat vitreux. Incolore, blanche.

Ch. Fond difficilement sur les bords au chalumeau après être devenue friable. Réact. 89; après quoi la liqueur filtrée et étendue précipite par l'addition de quelques gouttes d'acide sulfurique.

On rencontre l'harmotome, soit dans les amygdaloïdes, soit dans les filons métallifères.

Etym. : ἁρμός, jointure; τομή, division, parce que les cristaux se clivent parallèlement aux plans passant par les arètes opposées d'un octaèdre, qu'Haüy regardait comme la forme primitive de l'espèce.

Brewstérite. $H^{10}(Sr,Ba)Al^2Si^6O^{21}$. — P. S. = 2,12 à 2,2. — D. = 5 à 5,5.

S. monoclinique. R. A = 0,405 : 1 : 0,841; mm = 136°; ph^1 = 93°40'.

Clivage g^1 parfait.

Cette espèce, qui contient 8 à 9 % de strontiane avec 6 de baryte et 12 à 14 d'eau, se présente en prismes courts, à clivage g^1 parfait, fusibles avec bouillonnement et attaquables.

A. O. dans un plan normal à g^1. Biss. positive, perpendiculaire à g^1; 2V = 65°. $\rho > v$. Valeur moyenne de l'indice : 1,45; biréfringence : 0,012.

L'espèce, dédiée à Brewster, se trouve dans des roches éruptives basiques d'Écosse et d'Irlande.

REMARQUES SUR LA CRISTALLISATION DES ZÉOLITES

Mallard a fait remarquer que presque toutes les zéolites offrent une tendance caractérisée aux groupements multiples, dont l'Harmotome et la Christianite présentent les types les plus nets. Il est curieux de constater à quel point les rapports paramétriques des principales espèces diffèrent peu entre eux, comme le montre le tableau suivant :

ESPÈCES	SYSTÈME DE SYMÉTRIE	RAPPORT D'AXES
THOMSONITE	Rhombique	711 : 702 : 976
GISMONDINE	Quadratique	707 : 707 : 1044
MÉSOTYPE	Rhombique	713 : 701 : 251
SCOLÉSITE	Monoclinique	715 : 699 : 212
STILBITE	Rhombique	733 : 680 : 554
LAUMONTITE	Monoclinique	722 : 756 : 500
EDINGTONITE	Quadratique	707 : 707 : 951

Tous ces rapports d'axes peuvent être ramenés, à peu de chose près, aux trois types suivants, lesquels conviennent aussi à l'Harmotome, à la Christianite et à l'Analcime : 707 : 707 : 2 × 500. — 707 : 707 : 500. — 707 : 707 : $\frac{1}{2}$ × 500.

Or le rapport 707 : 707 : 500 est celui de $\sqrt{2}$: $\sqrt{2}$: 1, c'est-à-dire celui de *deux axes binaires et un axe quaternaire* dans l'assemblage cubique; on peut donc dire que les principales zéolites ont toutes un réseau *pseudo-cubique*, et ainsi s'expliquent, conformément aux idées de Mallard, ces groupements caractéristiques, auxquels participent la Stilbite, comme l'a montré M. Von Lasaulx, et la Gismondine, ainsi que l'a établi M. Schrauf.

Terminons en disant que les propriétés optiques des zéolites peuvent difficilement être établies avec certitude, à cause de l'eau de combinaison dans laquelle elles sont comme *noyées*, et dont nous savons qu'une partie peut s'échapper dans l'air sec.

APPENDICE

A l'exemple de Mallard (1), nous rapporterons au groupe des zéolites un certain nombre de silicates hydratés, crypto-cristallins, tels que la **Bravaisite** (silicate d'alumine avec fer, chaux, magnésie, potasse et eau), la **Carpholite**, où l'alumine et la silice sont unies à l'oxyde manganeux et à l'eau, enfin la **Glauconie**, silicate hydraté d'oxyde ferrique et de potasse, presque toujours aluminifère. Cette dernière espèce, qui renferme 40 à 58. SiO^2, 18 à 24. Fe^2O^3, 5 à 13. K^2O, 1 à 13. Al^2O^3, 7 à 12. H^2O et un peu de magnésie, abonde sous forme de grains verts dans les terrains stratifiés. La structure de ces grains est crypto-cristalline; on y note quelques clivages, et M. Lacroix a reconnu que le minéral était le plus souvent biaxe.

La glauconie qui se forme actuellement dans certaines mers est ferrique, contenant 30,83 °/₀. Fe^2O^3 contre 3,10. FeO et 2,41. MgO. Elle deviendrait ferreuse par suite d'un métamorphisme réducteur. Il y aurait trois stades, l'un

(1) *Bull. Soc. minér.*, I, p. 7. — Toutefois M. Lacroix pense que, dans ces diverses substances, l'eau est basique; de sorte qu'il conviendrait plutôt de les rapporter aux *leptochlorites*, sauf la Nontronite, qui serait un appendice des argiles.

où le minéral, remplissant une chambre de foraminifère, est un silicate d'alumine ; un second, où se formerait un silicate ferrique peu alumineux ; enfin un troisième, où la glauconie prendrait naissance par apport de potasse (1).

Il convient de rapprocher de la glauconie la *Terre verte* ou *Céladonite*, minéral amorphe, produit habituel d'altération du pyroxène et de l'amphibole, fréquent dans les amygdaloïdes du nord.

La **Nontronite**, en rognons et enduits jaunes ou verdâtres, à toucher gras, renferme 43. SiO^2 ; 36. FeO ; 21. H^2O. On l'a observée d'abord à Nontron (Dordogne). M. Lacroix a reconnu que ses fibres avaient un allongement positif, bien que le signe optique soit négatif.

Un autre silicate hydraté, la **Chlorophæite**, à 33. SiO^2 ; 21,5. FeO ; 3,5. MgO et 42. H^2O, forme des aiguilles cristallines vertes, en petits amas dans les amygdaloïdes de la région écossaise (P. S. = 1,8 à 2).

Enfin il paraît convenable d'ajouter à cette nomenclature, autant du moins qu'on puisse admettre l'individualité de l'espèce, la **Palagonite**, de Palagonia en Sicile (32 à 34. SiO^2 ; 5 à 12. Al^2O^3 ; 10 à 33. Fe^2O^3 ; 3 à 7. CaO ; 2 à 11. MgO ; 0,6 à 4. Na^2O ; 0,4 à 3. K^2O ; 12 à 23. H^2O), minéral amorphe en grains jaunes, bruns, rouges ou noirs, à éclat vitreux, facilement fusible, qui forme la base des tufs dits palagonitiques (P. S. = 2,4 à 2,7. — D. = 4 à 5). Mais ce minéral n'est pas homogène et il est certain qu'on comprend habituellement, sous cette désignation, à la fois le verre basaltique, les produits de sa décomposition et les minéraux qui s'y sont isolés.

TROISIÈME ORDRE

SILICATES DE MÉTAMORPHISME

PREMIÈRE CLASSE

SILICATES D'ALUMINE

FAMILLE DES SILICATES ANHYDRES D'ALUMINE

Les plus simples parmi les silicates qui doivent leur origine au métamorphisme sont des silicates, généralement anhydres, d'alumine avec ou sans oxyde de fer, dont beaucoup résultent de la cristallisation de masses primitivement argileuses et amorphes.

(1) Collet et Lee, *Comptes rendus*, CXLII, p. 999.

Andalousite. Al^2SiO^5. — P. S. = 3,10 à 3,17. — D. = 7 à 7,5.

S. rhombique. R. A. = 0,986 : 1 : 0,702. — *mm* = 90°4'8 ; *pa*¹ = 144°32' ; *pe*¹ = 144°55'.

L'andalousite, où l'analyse ne révèle que 0,7 à 1,8 °/₀ d'oxyde ferrique, cristallise en prismes presque exactement quadratiques, parfois assez gros. Les combinaisons dominantes sont *mp* ; *me*¹ ; *mpe*¹ ; *mpa*¹, etc. Clivage parfait suivant *m*, dans la variété du Brésil ; imparfait suivant *h*¹ ; traces suivant *g*¹ et *c*¹.

Éclat vitreux. Vert olive, rouge ou rose, grise, violette.

Opt. Signe négatif. A. O. dans *g*¹, avec Biss. normale à *p*. 2 V = 84°,5 (rouge) ; 2E = 96°,5. n_g = 1,643 ; n_m = 1,638 ; n_p = 1,632. Polychroïsme énergique dans les variétés colorées du Brésil, avec teintes variant du vert olive au rouge sang.

Fig. 454.

Infusible. Réact. 81. Ne s'attaque que par l'acide sulfurique à 300°.

La **Chiastolite** ou **Macle** est une variété d'andalousite, d'angle légèrement différent (selon Des Cloizeaux, *mm* = 91°4'), qui a entraîné dans sa cristallisation un peu de la matière colorante du schiste noirâtre au milieu duquel elle est toujours contenue, et quelquefois une portion du schiste lui-même. Tantôt l'enveloppe vitreuse, claire et rosée, renferme au centre un prisme noir, relié aux angles par des lames noires ; tantôt les lames se terminent par quatre petits prismes noirs (fig. 454), formant la *macle pentarhombique* d'Haüy. Ces cristaux abondent dans certains schistes, dits *maclifères*. Les plus beaux, longs de 0ᵐ,13 et même plus, viennent des Salles de Rohan, près Pontivy, où on les rencontre au milieu de schistes siluriens fossilifères. La matière colorante est disposée, dans chaque cristal, non sous la forme d'un prisme, mais sous celle d'une pyramide très aiguë, de sorte que la section varie suivant les points.



Fig. 455. — Andalousite coupée parallèlement à l'axe vertical. Grossissement 120 diamètres. D'après MM. Fouqué et Michel-Lévy.



Fig. 456. — Andalousite. Section normale à l'axe vertical. Grossissement : 120 diamètres. D'après MM. Fouqué et Michel-Lévy.

Dans les roches, par exemple dans les schistes maclifères, l'andalousite se reconnaît aux lignes de clivage, presque rectangulaires, des plaques parallèles à *p*, ainsi qu'à la disposition des inclusions charbonneuses (fig. 455, 456).

Etym. De la province d'*Andalousie* en Espagne. Le mot *Chiastolite* vient du χ grec, avec lequel la section de la macle présente de la ressemblance. Quant au mot de *macle*, il dérive du latin *macula*, qui peut signifier *tache* ou *maille*.

Sillimanite. Al^2SiO^5, avec une petite partie de l'alumine remplacée par de l'oxyde ferrique. — P. S. = 3,17 à 3,24. — D. = 6 à 7.

S. rhombique. (R. A. = 0,687 : 1 : x).

On ne connaît encore que des formes prismatiques non terminées. Tandis que les auteurs donnent mm = 111° et g^3g^3 = 91°45', Mallard, pour faire ressortir les analogies de l'espèce avec l'andalousite, dont la composition est presque identique, adopte, avec M. Groth, g^3 pour face prismatique. Alors mm = 91°45' et R. A. = 0,970 : 1 : x (le paramètre de l'axe vertical étant inconnu).

Clivage h^1 très facile et très net.

Éclat vitreux, un peu gras en dehors des clivages. Gris jaunâtre; blonde ou brun de girofle.

Opt. Biréfringence énergique, de signe posit. Dispersion considérable. $\rho > v$. A. O. dans h^1, avec la normale à p pour Biss. 2V = 26°. 2E = 44° (rouge); 37° à 38° (violet); n_g = 1,608; n_m = 1,661; n_p = 1,659.

Couleurs de polarisation très limpides.

Infusible. Réact. 81. Inattaquable.

Etym. : Dédiée à Silliman.

La sillimanite et l'andalousite forment parfois des groupements réguliers, où les axes des deux minéraux coïncident.

La **Fibrolite** ou *Faserkiesel*, avec laquelle ont été fabriqués autrefois d'assez nombreux outils de pierre, n'est qu'une sillimanite très compacte, redevable de sa dureté à l'enchevêtrement de fibres très fines. Elle est assez abondante au milieu des gneiss modifiés par la granulite, où elle se distingue, au microscope, par ses minces aiguilles et l'entrelacement de ses fibres (fig. 457). On en trouve d'assez gros cailloux roulés dans les alluvions des rivières de l'Auvergne.

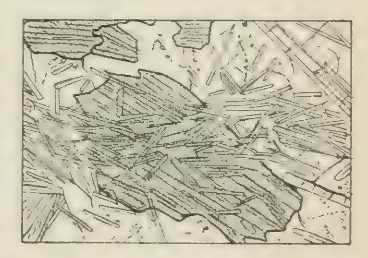


Fig. 457. — Aiguilles et fibres de sillimanite dans le mica et le quartz d'un gneiss granulitique. Grossissement : 50 diamètres. — D'après MM. Fouqué et Michel-Lévy.

La *Bucholzite* est aussi une sillimanite fibreuse et compacte.

La **Dumortiérite**, $Al^8Si^3O^{18}$ (P. S. = 3,36. — D. = 7), d'une belle couleur bleu de cobalt, accompagne la Sillimanite dans le gneiss à cordiérite. Rhombique et pseudo-hexagonale, en fibres ou en agrégats columnaires, avec clivage h^1, elle se distingue par son signe optique négatif et par l'intensité de son polychroïsme, extraordinairement marqué, même en lames minces, donnant du bleu azur (n) et du jaune presque incolore (n_g). Indice : 1,65 en moyenne; biréfringence : 0,01. A. O. dans g^1; Biss. normale à p. $\rho < v$.

Disthène. Al^2SiO^5. — P. S. = 3,48 à 3,68. — D. = 5 sur les faces latérales les plus larges, dans le sens de la longueur et D. = 7 sur les mêmes faces dans le sens transversal.

S. triclinique. R. A. = 0,899 : 1 : 0,697 (1). Angles fondamentaux : yz = 90°23′ (90°5′ d'après vom Rath) ; xz = 100°18′ ; xy = 106°1′ ; mt = 97° ; mh^1 = 130°44′ ; mg^1 = 123°11′) ; ph^1 = 79°10′ ; pg^1 = 96°6′.

Combinaison habituelle ; g^1h^1, avec troncatures m et t ; terminaison p rare (fig. 458). Clivage parfait suivant h^1, moins parfait suivant g^1, imparfait suivant p.

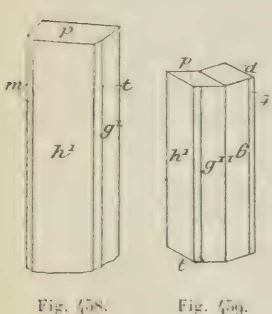


Fig. 458. Fig. 459.

Macles fréquentes avec h^1 pour face d'accolement, l'axe d'hémitropie pouvant être la normale à h^1 (fig. 459), ou l'arête pg^1, ou l'arête g^1h^1, qui toutes trois sont des axes pseudo-binaires de l'espèce.

Fragile. Transparent ou translucide. Éclat nacré sur h^1, vitreux sur les autres faces. Incolore, blanc, plus souvent bleu de ciel (d'où le nom de *Cyanite*), vert, gris, noirâtre.

Opt. Signe négatif. Biss. presque normale à h^1. Plan A. O. sensiblement perpendiculaire à h^1 et incliné d'environ 30° sur l'axe vertical. $\rho > v$ faible. 2V = 82° ; 2H = 99° à 101°. n_g = 1,728 ; n_m = 1,720 ; n_p = 1,712 (rouge). Polychroïque quand la coloration bleue est intense. Relief en plaques minces très marqué.

Infusible ; inattaquable ; se dissout dans le sel de phosphore en laissant un squelette de silice. Réact. 81.

En cristaux dans les schistes anciens, souvent avec paragonite et staurotide. La *Rhætizite* est un disthène en masses fibreuses ou bacillaires, tantôt blanches, tantôt colorées en noir par le graphite.

Etym. : *Disthène* vient du grec δίς, deux fois, et σθένος, fort, par allusion à l'inégale dureté suivant les directions.

Staurotide. $H^5(Fe, Mg)^6 Al^{24} S^{11} O^{66}$. — P. S. = 3,3 à 3,8. — D. = 7 à 7,5.

S. rhombique. R. A. = 0,694 : 1 : 0,979 (2).

Suivant la remarque de Mallard, ce rapport équivaut à peu de chose près à 0,707 : 1 : 1, ou 1 : $\sqrt{2}$: $\sqrt{2}$; c'est-à-dire que le réseau de la staurotide est pseudocubique, la brachydiagonale jouant le rôle d'un axe pseudoquaternaire, tandis que les deux autres axes sont pseudobinaires. Dans cette conception, mm = 110°28′ ; $p\,a^3/_2$ = 115°17′ adj. ; $a^3/_2a^3/_2$ = 129°26′ sur h^1.

(1) D'après M. Bauer. Le changement de l'un des axes horizontaux fait ressortir, selon Mallard, une symétrie-limite pseudorhombique. — (2) D'après Mallard. Ordinairement, on admet R. A. = 0,472 : 1 : 0,680, c'est-à-dire qu'on place verticalement l'axe macrodiagonal de Mallard, en multipliant son paramètre par $\frac{3}{2}$, ce qui change $a^3/_2$ en m et m (Mallard) en a^1.

Les cristaux, d'ordinaire prismatiques et d'apparence hexagonale, ce qu'on expliquait autrefois par la coexistence de p, m, g^1, parfois avec le dôme a^1, devraient être placés avec leur grand axe horizontal (fig. 460), et notés $p\, g^1\, m\, a^3/_2$.

Cette manière de voir a l'avantage de fournir une explication simple des macles habituelles de la staurotide (1). Nous rappellerons que, dans l'une, la macle en croix grecque (fig. 461), dite *Pierre de Croix* ou *Croisette* de Bretagne, l'un des individus de la macle a tourné de 90° autour de l'axe pseudo-quaternaire $p\, g^1$; tandis que dans la macle en croix de Saint-André (fig. 462), il y a eu rotation de 180° autour de l'axe pseudobinaire qui est la normale à $b^1/_2$, rotation après laquelle la direction ph^1 continue à faire, avec cette normale, un angle de 60°.

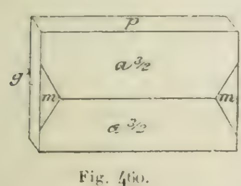


Fig. 460.

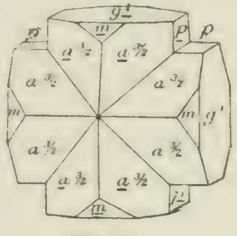


Fig. 461.

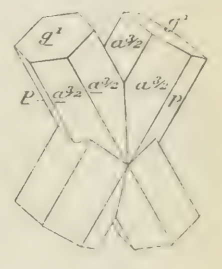


Fig. 462.

Faces g^1 rugueuses; $a^3/_2$ et p unies. Clivages : p net, mais interrompu; $a^3/_2$ imparfait. Cassure conchoïdale ou inégale. Éclat vitro-résineux; rouge foncé, brun rougeâtre, brun noirâtre. Inclusions charbonneuses. Couleur jaune d'or en lames minces.

Opt. Signe positif. A. O. dans h^1; Biss. normale à g^1. $2V = 88°,8$ à $89°,3$; $2H = 113°,2$ à $114°$; $\rho > v$. $n_g = 1,746$; $n_m = 1,741$; $n_p = 1,736$.

Infusible. En partie attaquable par l'acide sulfurique.

La staurotide abonde dans certains schistes, cristallins ou argileux. Souvent, notamment au Saint-Gothard, cette espèce est associée au disthène, dans une gangue de paragonite, de telle sorte que les faces p et les arêtes $a^3/_2$ de la staurotide soient respectivement parallèles aux faces m et aux arêtes mt du disthène.

Etym. : σταυρός, croix. La composition de la staurotide est très difficile à fixer; car l'espèce est rarement pure et la forte teneur en silice de certaines variétés (jusqu'à 51 %) tient à la présence de grains de quartz interposés. D'après les recherches les plus récentes, le fer y est surtout à l'état de protoxyde et, dans la staurotide pure, il y a environ 28 de silice contre 25 d'alumine.

A la suite de la Staurotide, mais avec la magnésie remplaçant le fer, vient se placer la **Saphirine**, $Mg^4Al^{10}Si^2O^{23}$, des micaschistes du Groenland. C'est un

(1) Voir plus haut, pp. 334, 335.

minéral monoclinique, de densité 3,42 à 3,47, avec une dureté de 7,5. Infusible, inattaquable, la Saphirine se présente en grains bleus dichroïques, ressemblant au saphir. Elle renferme 15. SiO^2; 63. Al^2O^3; 17 à 19. MgO; 2 à 4. FeO. Signe optique négatif; biréfringence : 0,009.

FAMILLE DES SILICATES D'ALUMINE HYDRATÉS

A la suite des silicates d'alumine anhydres viennent se placer les silicates hydratés, extrêmement nombreux, en tête desquels nous placerons d'abord les silicates exclusivement alumineux qui forment le genre Argile.

GENRE ARGILE

Nous classons dans ce genre toutes les substances qui sont essentiellement composées de silice, d'alumine et d'eau. Le nombre en est considérable, et nous nous bornerons à énumérer les principales.

Il résulte des recherches de M. Le Chatelier (1) qu'au point de vue chimique, les argiles peuvent être réparties en cinq groupes :

I. — Le premier groupe, celui de l'**Halloysite**, répond à la formule $H^4Al^2Si^2O^9 + Aq$. Dans la calcination de ces argiles, l'eau hygrométrique Aq a complètement disparu à 250 degrés; après quoi il faut chauffer au-dessus de 400° pour chasser l'eau combinée H^4O^2. Enfin à 1000° se manifeste un brusque accroissement de température, indiquant la production d'un phénomène chimique avec dégagement de chaleur. Le phénomène consiste dans une transformation moléculaire de l'alumine, qui devient insoluble dans les acides. Cette alumine libre provient de la décomposition que l'argile a subie au moment de sa déshydratation.

Le type du groupe est l'**Halloysite** (dédiée à d'Omalius d'Halloy). — P. S. = 1,92 à 2,20. — D. = 1 à 2. — 41 à 46. SiO^2; 35 à 40. Al^2O^3; 14 à 24. H^2O. C'est un minéral amorphe, non plastique, à cassure conchoïdale ou esquilleuse, d'éclat vitreux, parfois translucide, blanc laiteux, vert ou jaune, happant à la langue, infusible et entièrement attaquable avant cuisson. Devient translucide et même transparent par immersion dans l'eau. Il se présente d'ordinaire en filons et en gîtes de contact.

La *Lithomarge* ou *Steinmark* est une variété d'Halloysite, de teinte rouge, brune, jaune, bleue ou violette. D'autres variétés sont la *Lenzinite* de la Haute-Vienne et de l'Eifel, le *Savon blanc* de Plombières (2), dit aussi *Savon de montagne* ou *Oropion*, déposé par les eaux thermales; la *Sévérite* de Saint-Sever

(1) *Bull. Soc. minér.*, X, p. 204. — (2) Ce minéral a été qualifié de *Saponite*, nom déjà donné à une serpentine.

(Landes), la *Glossecollite*, blanche et très fragile, etc. Ces diverses sortes d'argiles sont dites *argiles chimiques*, parce qu'elles se présentent en filons ou comme produits évidents de l'action d'eaux minérales. Elles sont souvent très pures et d'une grande finesse de grain.

Les *argiles sédimentaires* sont des mélanges très variables de quartz, de silicate d'alumine cristallisé et d'argile colloïdale. Quand on les a débarrassées, par lavage, du quartz, il en est un bon nombre qui offrent la composition et les caractères chimiques des halloysites. A cette section se rapportent la plupart des *Argiles réfractaires*, comme celles de Forges, de Bollène, etc.; très plastiques, blanches, grises, jaunâtres, noirâtres, parfois marbrées, elles constituent, selon leur pureté, la *terre à creusets*, la *terre de pipe*, la *terre à poteries-grès et à faïences*. Ce qu'on appelle l'*argile plastique* est une argile sédimentaire, happant fortement à la langue et éprouvant à l'air un retrait marqué; la *terre glaise* en est une variété impure, mélangée de calcaire et passant à la *marne* quand la proportion de calcaire varie de 15 à 50 %.

II. — Le second groupe, celui de l'**Allophane**, perd toute son eau entre 150° et 400° et subit, comme le premier, un changement moléculaire à 1000°. Sa formule est $SiAl^2O^5 + Aq$. Le type est l'**Allophane**. — P. S. = 1,85 à 2,02. — D. = 3. — Masses mamelonnées ou rognons; bleu d'azur, bleu de ciel, vert de gris; jaune de miel, rouge, blanche, éclat cireux ou vitreux; devient blanche au chalumeau et colore souvent la flamme en vert, par suite de la présence du cuivre, aux minerais duquel elle est fréquemment associée. Elle peut contenir jusqu'à 40 % d'eau et est généralement colloïde.

Etym. : ἄλλος, autre; φαίνω, paraître; d'après Dana, parce qu'elle change d'aspect au chalumeau; selon d'autres, parce qu'on l'a prise pour un minerai de cuivre.

A l'allophane se rapporte la *Collyrite* des Pyrénées, en masses concrétionnées, d'un blanc de neige, happant fortement à la langue.

III. — Le type du troisième groupe est le **Kaolin** ou *terre à porcelaine*. Sa formule est $H^4Al^2Si^2O^9$. — P. S. = 2,2. — D. = 1.

Généralement blanc, infusible, inattaquable par l'acide chlorhydrique, il est décomposé par l'acide sulfurique bouillant, perd son eau à 770° et n'éprouve, à 1000°, qu'une transformation moléculaire insensible. Il happe légèrement à la langue, devient plastique quand on le délaye dans l'eau et ne subit pas de retrait par la cuisson.

Les plus beaux gisements de Kaolin accompagnent les pegmatites et les granites à mica blanc. La substance y est pénétrée de grains de quartz et semble résulter de la décomposition éprouvée par la matière feldspathique au moment même de sa formation. Une variété de Red Mountain (Colorado) se montre bien cristallisée en petites paillettes assez nettement biaxes, d'apparence

hexagonale, avec bissectrice négative presque perpendiculaire à p. Les sections transversales s'éteignent à 15 ou 20° des traces du clivage facile.

Etym. : Corruption du mot chinois *Kauling*, nom d'une localité où la substance est exploitée.

C'est au Kaolin que doit se rattacher la **Pholérite** des schistes argileux de Lodève ou des terrains houillers de Belgique et de l'Allier, substance en écailles blanches nacrées, douces au toucher, d'apparence hexagonale. La **Nacrite** de Saxe et de Lodève (P. S. = 2,35 à 2,63. — D. = 0,5) n'en serait pas distincte. D'un blanc de neige, à éclat nacré, cette substance est biaxe et gonfle sous le chalumeau.

En résumé le groupe du Kaolin renfermerait toutes les variétés nettement cristallisées de silicate hydraté d'alumine.

On admet maintenant (1) pour le Kaolin ou *Kaolinite* la symétrie monoclinique, avec R. A. = 0,575 : 1 : 1,599; $mm = 120°34'$; $ph^1 = 96°49'$. Signe opt. négatif. A. O. dans g^1. Biss. inclinée de 20° sur la normale à p. 2V voisin de 90°. Biréfringence : 0,009.

La *Leverriérite* en est une variété colorée.

IV. — La **Pyrophyllite**, $H^2Al^2Si^4O^{12}$, est le type du quatrième groupe, qui se déshydrate entre 700° et 850°, sans manifester à 1000° aucun dégagement de chaleur.

P. S. = 2,78. — D. = 1.

La pyrophyllite est en cristaux bacillaires onctueux, probablement monocliniques, à clivage micacé parfait suivant p, de signe négatif, avec 1,58 pour valeur moyenne de l'indice et une biréfringence de 0,041. Elle peut renfermer un peu de magnésie. Une partie de la **Pagodite** (2) et l'**Agalmatolite** (ἄγαλμα, image, pour rappeler le nom allemand de *Bildstein* ou pierre à statuettes), avec lesquelles les Chinois font beaucoup de menus objets de sculpture, se rangent à côté de la Pyrophyllite. La Pagodite est ordinairement marbrée de rouge et de gris. L'Agalmatolite est d'un vert pâle, à éclat gras. Cette dernière substance renferme de 6 à 10 % de potasse. — P. S. = 2,755. — D. = 2,5 à 3.

Il est possible que la *Cimolite* de l'île Cimolis (Grèce), qui contient très peu d'eau, doive être réunie à la Pyrophyllite. En tout cas, la même composition chimique, celle du quatrième groupe, caractérise, selon M. Le Chatelier, toute une série importante d'*argiles plastiques* et *réfractaires*, offrant la même allure par calcination et présentant ce caractère remarquable, de ne subir aucun retrait par la cuisson. Des gisements de ce genre existent à Montereau et en Belgique. On emploie ces argiles pour la verrerie et la construction des fours en briques non cuites.

(1) Lacroix, *Minéralogie de la France*, I, p. 461. — (2) Le nom de Pagodite est souvent appliqué à des objets formés de Stéatite.

V. — Les argiles du cinquième groupe sont généralement très impures, contenant des alcalis, de la chaux, du fer et du manganèse, dont la présence se manifeste par la fusibilité de la matière. On peut les ranger autour de la **Montmorillonite** de la Vienne, argile savonneuse d'un rose clair, et surtout de la **Stéargillite** de Poitiers, substance blanchâtre un peu bariolée, à éclat gras, dont la composition est exprimée par $H^2Al^2Si^4O^{12} + Aq$. C'est la même formule que pour la Pyrophyllite, mais avec addition d'une notable quantité d'eau hygrométrique qui part à 200°, en provoquant un ralentissement très marqué dans l'échauffement de la substance. D'ailleurs, comme les argiles du quatrième groupe, les Montmorillonites ne dégagent pas de chaleur par la calcination.

La *Confolensite* de la Charente, les *Argiles smectiques* de Reigate (Angleterre) et de Styrie, sont des variétés de Montmorillonite. Les noms d'Argile smectique, *Smectite* ou *Terre à foulon* sont appliqués aux argiles qui servent à fouler les draps, et dont la plupart sont des argiles sédimentaires grisâtres ou bariolées, fusibles.

La *Farine fossile* des Chinois, qui contient des matières organiques, entre autres 7 millièmes d'azote, est une variété de Smectite. Il paraît en être de même de la *Malthacite* du basalte de Saxe, ainsi que de la *Miloschine*.

La division précédente des argiles en cinq groupes est basée sur la composition chimique. Mais, en tenant compte des caractères physiques, très importants en raison des applications industrielles, il y aurait lieu de répartir ces substances en deux séries : la première renfermant les argiles amorphes, colloïdales, résultat de précipitation chimique et dépourvues de plasticité (Halloysite, Montmorillonite, etc.; la seconde comprenant les argiles plastiques, qui seules peuvent être employées en céramique (kaolins, argiles réfractaires, argiles plastiques, cimolite, etc.).

Les argiles vraiment plastiques sont lamellaires et se résolvent par le délayage en très minces paillettes évidemment cristallines; car lorsqu'on parvient à les observer par la tranche, on constate qu'elles agissent sur la lumière polarisée.

Pour terminer, ajoutons un mot relativement aux substances renfermées sous la désignation générique de **Bol**. On appelle ainsi les argiles contenant beaucoup d'oxyde de fer. Elles sont brunes, quelquefois rouges, et prennent un faible éclat cireux dans la raclure. Happant fortement à la langue, elles ne sont pas plastiques et fondent au chalumeau en émail jaune ou brun. P. S. = 1,6 à 2. D. = 1,5 à 2,5.

Les bols sont souvent des produits du métamorphisme par le contact du basalte avec le granite ou le grès bigarré.

La *Sinopite* des anciens, employée dans la peinture, la *Sphragide*, la *Mélinite*, comprenant une partie des *ocres jaunes*, notamment la *Vierzonite*, sont des variétés de bol contenant de 6 à 38 % d'oxyde de fer.

DEUXIÈME CLASSE

SILICATES NON EXCLUSIVEMENT ALUMINEUX

Les espèces qui viennent d'être décrites proviennent toutes du métamorphisme de roches silicatées argileuses. Celles dont il va être question appartiennent à diverses catégories de roches, les unes siliceuses, les autres calcaires, magnésiennes ou ferreuses. Nous chercherons encore à les grouper, autant que possible, en catégories naturelles.

FAMILLE DES SILICATES ANHYDRES ou PEU HYDRATÉS

GENRE GRENAT

Tous les grenats répondent à la formule $R^3 R'^2 Si^3 O^{12}$, dans laquelle $R =$ Ca, Mg, Fe, Mn, Cr) et $R' =$ (Al, Fe, Cr), les éléments isomorphes des deux groupes pouvant se remplacer en proportions très diverses. Tous présentent une symétrie apparente cubique, avec prédominance du rhombododécaèdre b^1, tantôt seul, tantôt combiné avec a^2 fig. 463), ou même avec un hexoctaèdre

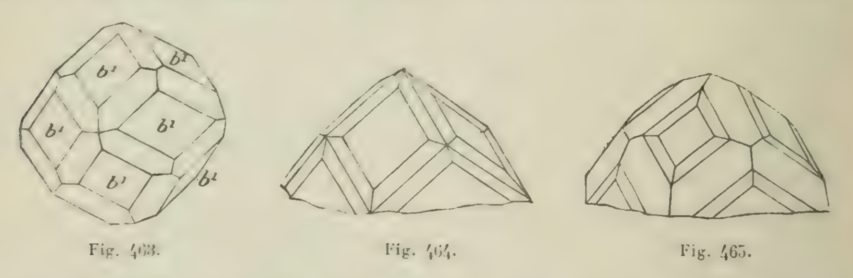


Fig. 463. Fig. 464. Fig. 465.

appartenant à la zone $b^1 a^2$ (fig. 464, 465). Les plus fréquents des hexoctaèdres sont $\{b^1 b^{1/2} b^{1/3}\}$ et $\{b^1 b^{1/3} b^{1/4}\}$. On trouve encore, avec le cube p et l'octaèdre a^1, tous deux fort rares, les formes $a^{4/3}$ et $a^{1/2}$. Le clivage est imparfait suivant b^1, la cassure conchoïdale ou esquilleuse ; la densité varie de 3,4 à 4,3 et la dureté oscille entre 6,5 et 8. Enfin, dans tous les grenats, le rapport d'oxygène est 1 : 1 : 2, c'est-à-dire que l'oxygène de la silice y est égal à la somme des quantités d'oxygène (d'ailleurs égales entre elles), des protoxydes et des sesquioxydes.

Les anomalies optiques sont fréquentes dans quelques types de grenats calcifères grossulaire, topazolite, ouwarowite) et font diagnostiquer une symétrie d'ordre inférieur, masquée par des groupements. D'après M. Klein, il existe quatre types principaux de groupements :

1° Huit rhomboèdres hémimorphes, groupés autour d'un centre et basés de manière que leurs bases engendrent un octaèdre; un axe optique négatif dans chaque rhomboèdre.

2° Douze pyramides rhombiques hémimorphes, groupées de même et formant un rhombododécaèdre; chacune avec une bissectrice négative normale à sa base.

3° Vingt-quatre pyramides engendrant un trapézoèdre.

4° Quarante-huit pyramides tricliniques, formant un hexoctaèdre.

La biréfringence du grenat, généralement très faible, peut, dans quelques cas, atteindre 0,005.

La nature des protoxydes permet de distinguer dans le grenat plusieurs espèces, qu'on peut grouper, selon les peroxydes, en trois sous-genres : 1° *grenats alumineux*, où R′ est surtout représenté par Al; 2° *grenats ferreux*, où R′ est principalement Fe, avec un peu d'Al; 3° *grenats chromifères*, où Cr domine dans R′.

PREMIER SOUS-GENRE

Grossulaire. $Ca^3Al^2Si^3O^{12}$. — P. S. = 3,4 à 3,6, s'abaissant à 2,95 après fusion. — D. = 6,5 à 7.

C'est le grenat *alumino-calcareux*, avec 40 % de silice et 37 de chaux, ordinairement associée à un peu d'oxyde ferreux et de magnésie. Combinaisons habituelles : b^1; a^2; $b^1 a^2$ avec l'angle $b^1 a^2 = 125°16'$; $a^2 \{b^1 b^1/_2 b^1/_3\}$ avec l'angle de 169°6′. Cassure conchoïdale ou inégale. Transparent ou translucide; facilement fusible en verre non magnétique. Lentement attaquable par l'acide chlorhydrique. Éclat vitreux. Couleur blanc verdâtre (*Wiluite* de Sibérie); vert d'herbe; jaune de miel (*Succinite*); jaune orangé (*Essonite*); rouge hyacinthe; brunâtre (*Romanzowite*); brun de cannelle (*Kancelstein*); noire, en petits dodécaèdres très nets (*Pyrénéite* de la Piquette déras lids); poussière blanche.

Indice = 1,7468 à 1,7714 (Na) et 1,7368 à 1,7645 (Li).

Etym. : *Grossularia*, groseille à maquereau.

Se trouve dans des calcaires ou des schistes chloriteux.

Pyrope. — $Mg^2Al^2Si^3O^{12}$. — P. S. = 3,7 à 3,8. — D. = 7,5.

Le pyrope ou grenat *alumino-magnésien*, qui doit son nom à son éclat, analogue à celui du feu, est le grenat de Bohème, contenant de 10 à 22 % de magnésie De couleur rouge sang ou rouge hyacinthe, il est de tous les grenats le plus difficilement fusible. La calcination le rend noir et opaque; mais en se refroidissant il redevient rouge et transparent. Il est généralement assez chromifère pour donner avec le borax la réaction du chrome. On y a trouvé jusqu'à 4 % d'oxydule de chrome. Le Pyrope n'est attaquable qu'après fusion et seulement en partie. On le trouve en grains à cassure conchoïdale dans la serpentine. Il

est utilisé pour la joaillerie et aussi comme émeri. Indice = 1,814 (Na); 1,777 (rouge).

Almandine. — $Fe^3Al^2Si^3O^{12}$. — P. S. = 3,5 à 4,3. — D. = 7 à 7,5.

L'almandine, ou grenat *alumino-ferreux*, est le grenat *oriental* ou *syrien* (*Escarboucle, grenat noble* des anciens). On y observe les combinaisons b^1; a^2; $b^1 a^2$; $p b^1$; $a^2 b^2$, etc., avec les deux hexoctaèdres que nous avons déjà indiqués. D'un rouge quelquefois brunâtre, il fond au chalumeau en boule noirâtre, assez magnétique. L'analyse y donne de 10 à 38 % d'oxyde ferreux.

L'almandine est le plus répandu de tous les grenats; on la trouve dans les gneiss, micaschistes, chloritoschistes, quelquefois dans les calcaires cristallins. Les dodécaèdres d'almandine, assez gros en apparence, sont souvent réduits à une croûte extérieure, enveloppant un noyau de chlorite. — Indice = 1,767 (Na); 1,772 (rouge).

Etym. : *Alabandicus*, nom de Pline, tiré d'une ville de l'Asie Mineure où l'on polissait le grenat syrien.

Spessartine. — $Mn^3Al^2Si^3O^{12}$. — P. S. = 3,77 à 4,27. — D. = 7 à 7,5.

Ce grenat, ainsi nommé à cause de sa présence dans le Spessart en Bavière, est *alumino-manganésien* et renferme de 30 à 35 % d'oxyde manganeux. Il présente ordinairement la combinaison $b^1 a^2$, avec une couleur qui varie du jaune au rouge brun par le rouge hyacinthe. Facilement fusible au chalumeau. Réact. 47. On le trouve souvent dans les pegmatites, ainsi que dans le coticule ardennais, auquel il donne sa dureté.

DEUXIÈME SOUS-GENRE

Mélanite. — $Ca^3Fe^2Si^3O^{12}$. — P. S. = 3,6 à 4,3. — D. = 7.

Le grenat *ferro-calcareux* a été nommé Mélanite à cause de la couleur, d'un noir de velours, qu'il présente en divers gisements. Les formes dominantes sont b^1 et a^2. Quelquefois, comme dans la vallée de Pfitsch, on y observe des rudiments de p et b^2. L'analyse y donne 36 à 38 % SiO^2 avec 30 à 32 CaO. Les couleurs du mélanite sont très variables : vert pomme (mélanite granulaire de Zermatt); jaune pâle ou vert émeraude (*Topazolite*); vert éclatant (*Demantoïde*); brun; vert noirâtre en écailles minces; noir; poussière grise; quelquefois magnétique. Fond facilement au chalumeau. Aisément attaquable, quand il est pur, par l'acide chlorhydrique; autrement, il faut une fusion préalable. Nous rappellerons que les cristaux de *Topazolite* portent des stries pyramidales, qui ont fait reconnaître à Mallard la symétrie en réalité rhombique du grenat. La variété *Aplome*, jaune verdâtre ou brune, où domine la forme a^2, offre des

groupements intérieurs qui permettent sa division en 12 et même 48 pyramides. Ces deux variétés de mélanite sont les plus pures. M. Em. Bertrand a reconnu que, dans les cristaux élémentaires du grenat aplome, l'écartement des axes optiques est voisin de 90 degrés. Le *Colophonite*, d'un brun de colophane virant au noir de poix (*Pechgranat*), accompagne le fer oxydulé à Arendal ; mais une partie au moins de cette variété doit être rattachée à l'Idocrase. Le mélanite proprement dit, fréquent, comme élément accessoire, dans les phonolites, leucitophyres, néphélinites, téphrites, existe en abondance à Frascati, près de Rome, dans un tuf volcanique. L'*Allochroïte*, en masses compactes, appartient au mélanite.



Fig. 466. — Section d'Almandine dans un schiste cristallin. Grossissement : 100 diamètres. — D'après MM. Fouqué et Michel-Lévy.

Le nom de *Rothoffite* désigne un grenat où l'oxyde manganeux est associé à l'oxyde ferreux. Enfin, dans l'*Yttergranat*, c'est l'yttria qui vient s'y ajouter.

Quelques auteurs désignent sous le nom de *Grenat commun* un minéral formé du mélange isomorphe des molécules du Grossulaire, de l'Almandine et du Mélanite. Cette variété se remarque dans certaines grenatites, dans les éclogites, les amphibolites et divers schistes cristallins. Sa couleur varie du brun rouge au rouge jaunâtre.

Dans les plaques minces, le grenat commun et l'almandine offrent rarement des contours bien définis. Leurs sections sont parcourues par une foule de fissures irrégulières (fig. 466). Tandis que l'almandine est sensiblement isotrope, le grenat commun, où la structure en zones concentriques est fréquente, offre souvent des anomalies optiques.

TROISIÈME SOUS-GENRE

Ouwarowite. $Ca^3Cr^2Si^3O^{12}$. — P. S. = 3,42 à 3,51. — D. = 7,5 à 8.

Ce grenat, qui peut être appelé *chromo-calcareux*, renferme 37 °/₀ SiO^2 avec 23. Cr^2O^3 et 31. CaO. On y trouve en général 6 °/₀ d'alumine.

La forme ordinaire est b^1 et les cristaux, plus ou moins translucides, sont d'un beau vert émeraude et infusibles au chalumeau. Réact. 49. Associée au fer chromé dans l'Oural, l'Ouwarowite est toujours biréfringente.

Étym. : Dédiée au ministre Ouwarow.

Un grenat chromifère des Pyrénées est voisin de l'Ouwarowite.

A côté du genre Grenat vient se placer l'Idocrase, qui peut être regardée comme un grenat quadratique.

Idocrase. $H^2(Ca,Mg)^6(Al^2,Fe^2)^2Si^7O^{29}$ ou $H^4(Ca,Mg)^{12}(Al^2,Fe^2)^3Si^{10}O^{43}$. — P. S. = 3,34 à 3,8. — D. = 6,5.

L'analyse donne 37 à 39. SiO^2 ; 12 à 23. Al^2O^3 ; 2 à 8. Fe^2O^3 ; 30 à 36. CaO ; 2 à 7. MnO et MgO ; 1,5 de perte au feu.

S. quadratique (au moins en apparence) ; R. A. = 1 : 0,517 ; $b^1/_2b^1/_2$ sur p = 105°33' ; pa^1 = 151°45' ; $mb^1/_2$ varie de 127°13' à 126°44'.

Combinaisons habituelles : $mh^1pb^1/_2$ (fig. 467) ; $mh^1b^1/_2a^1$ (fig. 468) ; mêmes formes avec le dioctaèdre $\{b^1/_2b^1/_4h^1\}$. Cristaux le plus souvent prismatiques, parfois tabulaires, ou octaédriques. Angle $b^1/_2b^1/_2$ adjacent = 129°21' ; ma^1 = 109°33'. En général, les prismes sont striés longitudinalement. Clivages peu nets m,h^1 et p. Cassure inégale et esquilleuse.

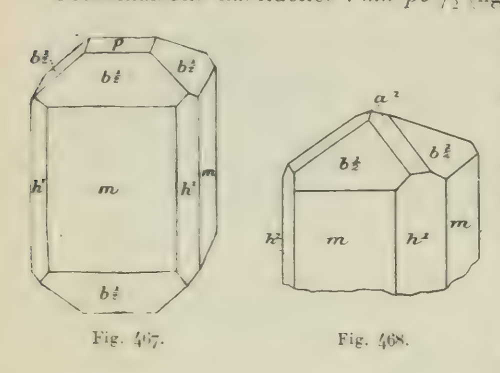


Fig. 467. Fig. 468.

Signe optique négatif (1). Biréfringence très faible ; n_o = 1,719 à 1,722 ; n_e = 1,718 à 1,720. Anomalies optiques fréquentes, faisant diagnostiquer une symétrie réelle monoclinique.

Éclat vitro-résineux. Vert pistache, vert olive, vert émeraude ; jaune ; jaune verdâtre, jaune de miel ; brune ; brun rouge ; bleu de ciel (*Cyprine*). Polychroïque. Au chalumeau, fond facilement avec bouillonnement. La cyprine donne la réaction du cuivre. Très difficilement attaquable.

L'idocrase abonde au Vésuve (d'où le nom de *Vésuvienne*), dans les blocs dolomitiques de la Somma, où les cristaux offrent la combinaison $mh^1h^2h^3pa^1b^1/_2b^1_4/b^1/_8$ avec 4 ou 5 dioctaèdres. Haüy a décrit un cristal de cette provenance avec 90 facettes. La forme $b^1/_2b^1/_4h^1$ est connue au Tyrol. On trouve aussi l'idocrase dans divers calcaires saccharoïdes et dans les schistes chloriteux, etc. Ce minéral se présente quelquefois à l'état de roche compacte. Une partie au moins du *Colophonite* lui appartient.

On trouve au Piz Longhin, dans les Grisons, une variété d'idocrase qui offre beaucoup de ressemblance avec la Néphrite.

Étym : εἶδος, forme ; κρᾶσις, mélange ; par allusion au grand nombre des facettes, rappelant les formes du zircon, de la cassitérite, etc.

La **Gehlénite** (dédiée à Gehlen) est aussi un silicate alumino-calcaire quadratique, provenant du métamorphisme d'un calcaire du Tyrol et de formule

(1) Dans quelques cristaux, formés de zones concentriques, des bandes positives alternent en petit nombre avec les bandes négatives, et la valeur de la biréfringence n'est pas la même pour toutes les zones.

$Ca^3(Al,Fe)^2Si^2O^{10}$, avec 30 °/₀. SiO^2 ; 22. Al^2O^3 ; 38. CaO, un peu de magnésie et de fer, enfin 1,28 d'eau. — P. S. = 2,95 à 3. — D. = 5,5 à 6 ; R. A. = 1 : 0,4 ; $pb^1/_2$ = 150°30' ; forme ordinaire ph^1 ; clivage p. Signe optique négatif ; n_0 = 1,663 ; n_e = 1,658. Facilement attaquable en faisant gelée.

La **Partschine**, en petits grains jaunâtres (P. S. = 4,01. — D. = 6,5), a la formule chimique d'un grenat alumineux, où les protoxydes consistent en 29. MnO ; 14. FeO et 3. CaO. Mais sa forme est le prisme monoclinique. R. A. = 1,224 : 1 : 0,790 ; ph^1 = 52°16' ; mm = 91°52'. On la trouve avec rutile dans des sables de Transylvanie.

L'**Helvine**, $(Mn,Gl,Fe)^7Si^3O^{12}S$, qui contient de 5 à 6 °/₀ de soufre, est associée au grenat dans un gneiss de la Saxe. On la trouve aussi dans les syénites éléolitiques. Les cristaux sont des tétraèdres réguliers, jaune de miel, bruns ou verts, d'éclat vitro-résineux, offrant les combinaisons : $+\frac{1}{2}a^1$, $-\frac{1}{2}a^1$; la même avec b^1 ; $\frac{1}{2}a^1$, $\frac{1}{2}a^2$, $\frac{1}{2}\{b^1b^1/_2b^1/_3\}$; etc. — P. S. = 3,2 à 3,37. — D. = 6 à 6,5. Indice : 1,739. Attaquable par l'acide chlorhydrique en formant gelée, avec dégagement d'hydrogène sulfuré.

Étym. : ἥλιος, soleil, à cause de sa couleur jaune.

L'*Achtaragdite*, également en tétraèdres, mais pyramidés, associée à l'idocrase et au grenat de Sibérie, paraît être un produit d'altération de l'Helvine.

Un autre silicate sulfurifère de glucine, avec zinc, manganèse et fer, est la **Danalite** du Massachusetts, qui cristallise dans le système cubique, en octaèdres et rhombododécaèdres, d'un rouge de chair.

Dans le voisinage immédiat de ces espèces, nous placerons la **Zunyite**, fluosilicate hydraté d'alumine avec traces d'alcalis, $H^{18}Al^{16}Si^6(O,Fl,Cl)^{15}$, qui se présente à Zunyi (Colorado), en compagnie de sulfure d'arsenic et de plomb. — P. S. = 2,875. — D. = 7.

L'espèce cristallise en petits tétraèdres réguliers, parfois avec le tétraèdre inverse, limpides, à éclat vitreux et clivage a^1. Inattaquable par les acides, infusible, dégage dans le tube de l'eau à réaction acide.

GENRE WERNÉRITE

Le genre *Wernérite* comprend un certain nombre d'espèces, qui toutes ont pour forme primitive un prisme quadratique, avec des propriétés optiques à peu près identiques. La Silice, l'alumine et la chaux y dominent, avec une certaine proportion d'alcalis ; mais le rapport d'oxygène est variable, oscillant entre les trois types : 1 : 2 : 3 ; 1 : 2 : 4 ; 1 : 2 : 5 ou 6. Quelquefois même on constate 1 : 3 : 4 ou 1 : 3 : 5 et 1 : 3 : 6. Le clivage m est bien marqué. Le signe optique est négatif et la biréfringence croît avec la teneur en chaux.

Les Wernérites sont généralement prismatiques. Aussi les a-t-on quelque-

fois rangées sous la dénomination de *Scapolites*, c'est-à-dire pierres en forme de *tiges*. D'autres fois on les désigne sous le nom de *Paranthines*. Du reste ces trois noms sont aussi employés pour désigner des types particuliers de la série. Enfin presque toutes les Wernérites sont des produits de métamorphisme, le plus souvent au contact d'une roche granitique et d'un calcaire.

M. Tschermak considère les Wernérites comme le résultat du mélange isomorphe de deux silicates, celui de la *Méionite*, ou $Me = Ca^4(Al^2)^3Si^6O^{25}$, et celui de la *Marialite*, ou $Ma = Na^4Al^3Si^9O^{24}Cl$. Le chlore entrerait dans cette composition à titre d'élément normal, associé au silicate de soude, de telle sorte que Na : Cl = 4 : 1 (1).

Cette vue est partagée par M. Judd (2), qui regarde la scapolite comme un feldspath ayant subi le dynamométamorphisme, avec introduction de chlorure de sodium.

M. Lacroix a montré que les indices de réfraction des wernérites décroissent de façon continue depuis Me jusqu'à Ma. Il a constaté aussi que, dans les ophites, le dipyre se produit aux dépens des feldspaths.

Méionite. — Depuis Me jusqu'à Me^2Ma. R. A. = 1 : 0,439. — P. S. = 2,73 à 2,74. — D. = 6.

L'analyse donne 40 à 48. SiO^2; 29 à 35. Al^2O^3; 17 à 25. CaO; 0 à 1,35. Cl, avec petites quantités de soude, potasse, magnésie.

Combinaisons habituelles : ma^1; mh^1a^1; $mh^1a^1b^1$; $mh^1h^2a^1b^1a_3$ (fig. 469); angle a^1a^1 adj. = 136°11′. Petits cristaux unis et brillants. Clivage *m* net. Parfaitement limpide à l'état de pureté, mais souvent pénétrée d'inclusions de mica noir et de hornblende. Éclat vitreux. Fond assez facilement au chalumeau. Soluble dans l'acide chlorhydrique avec dépôt de silice floconneuse. $n_o = 1,594$ à $1,597$; $n_e = 1,558$ à $1,561$. Anomalies optiques.

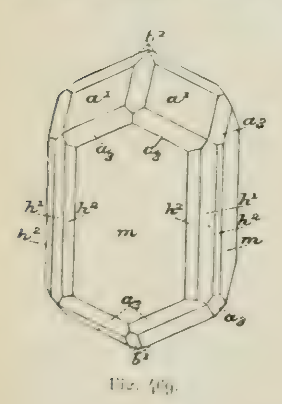


Fig. 469.

Se trouve dans des blocs calcaires rejetés de la Somma, au Vésuve, avec méroxène, sanidine, grenat noir et hornblende.

Etym. : μείων, moins, parce que la pyramide est moins aiguë que celle de l'idocrase.

La *Strogonowite* est une méionite verte ou jaune, engagée dans un calcaire au lac Baïkal.

Paranthine ou **Wernérite.** Depuis Me^2Ma jusqu'à $MeMa^2$. — P. S. = 2,63 à 2,79. — D. = 5 à 6. R. A. = 1 : 0,439.

Cette espèce, nommée aussi **Scapolite** ou **Ekebergite**, renferme de 48 à

(1) Zirkel, *Elemente*, 12e édit., p. 602. — (2) *Mineralogical Magazine*, 1889.

52. SiO^2; 23 à 28. Al^2O^3; 10 à 17. CaO; 1 à 8. Na^2O; 0 à 1,5. K^2O; 0 à 2,5. MgO; avec une perte au feu variable de 0,5 à 3. Tandis que la méionite contient 9 fois plus de chaux que de soude, la proportion, dans la paranthine, n'est plus que de 3 ou 4 à 1.

Combinaisons mh^1a^1; $mh^1a^1a^1/_3$; mh^1pa^1, etc. Incidences identiques avec celles de la méionite; $pa^1 = 148°9'$; éclat vitreux; couleurs variables. Blanchit et fond au chalumeau, en verre bulleux. Colore la flamme en jaune et donne quelquefois la réaction du fluor. Plus ou moins facilement attaquable par l'acide chlorhydrique. $n_o = 1,566$ (rouge); $n_e = 1,545$.

Les cristaux sont souvent volumineux, à surfaces parfois corrodées, engagés au contact du granite et d'un calcaire saccharoïde, en Scandinavie, en Finlande, au Tyrol. Une variété bleu de ciel, dite *Glaucolite*, se trouve aux environs du lac Baïkal, où l'on observe aussi, engagée dans l'orthose, avec outremer, une wernérite en grands cristaux blancs, de dureté 7,5, appelée *Paralogite*

Etym. : *Paranthine* vient de παρανθέω, je m'effleuris; *Wernérite*, de Werner.

Dipyre. De $MeMa^2$ à $MeMa^3$. — P. S. = 2,62 à 2,68. — D. = 6. R. A. = 1 : 0,635; $b^1m = 114°11'$.

L'analyse donne : 55 à 56. SiO^2; 23 à 24. Al^2O^3; 2,6 à 9,5. CaO; 8 à 9. Na^2O; 0,7 à 1. K^2O. Ainsi la chaux et la soude sont en quantités à peu près égales.

Combinaison usuelle : prisme mh^1, rarement terminé. Clivage m assez facile. Cassure vitreuse; limpide quand il n'est pas altéré. Incolore, blanc, lilacé; devenant blanc de lait en s'altérant. Blanchit et fond avec bouillonnement; difficilement attaquable. $n_o = 1,558$; $n_e = 1,543$.

Le dipyre se trouve en longues baguettes, à quatre ou huit pans, dans un calcaire saccharoïde à Pouzac (Hautes-Pyrénées). On le trouve également à Libarrenx (Basses-Pyrénées), dans un calcaire micacé, au voisinage de l'ophite ainsi que dans un schiste noir, sur les bords du Lés (Ariège). Enfin il a été signalé dans les pyroxénites et dans les diorites.

Etym. : δίς, deux fois, et πῦρ, feu, parce que la chaleur lui fait subir un double effet, la fusion et la phosphorescence.

La *Couseranite* du Couserans (Ariège), cristallographiquement et optiquement identique avec le dipyre, dont elle n'est qu'une variété en voie d'altération, offre la combinaison mh^1 avec l'un des deux prismes dominants. Elle contient 44. SiO^2; 33. Al^2O^3; 9. CaO avec 1,2. MgO; 4,5. Na^2O; 2,7. K^2O et 6 de perte au feu. Blanchâtre ou grisâtre, quelquefois noire, avec P. S. = 2,70 à 2,76 et D. = 5,5 à 6, elle fond facilement, mais s'attaque difficilement aux acides. Parfois elle est dans un schiste noir, en cristaux vitreux d'un noir bleuâtre ou en prismes courts. Mais le plus souvent elle est en prismes gris ou noirâtres dans un calcaire noir très pyriteux, près de Salex et de Seix. On la trouve aussi en prismes grisâtres dans les calcaires du port d'Aulus. Souvent

on a pris pour de la Couseranite : 1° des cristaux noirs d'orthose allongés suivant pg^1, dans les calcaires bitumineux d'Héas ou de Seix; 2° des cristaux de hornblende noire des calcaires de Troumouse; 3° des cristaux de quartz noir dans les calcaires de Pouzac et de la vallée d'Ossau.

La *Scolexérose* de Pargas est une wernérite blanche, translucide ou opaque, contenant 54. SiO^2; 29. Al^2O^3; 16. CaO; avec 1 de perte au feu.

La *Marialite* du peperino de Pianura, de $MeMa^3$ à Ma, est une wernérite chlorurée et sodique, tandis que la *Mizzonite* de la Somma et du lac de Laach serait intermédiaire entre la Méionite et la Paranthine.

La *Sarcolite* du Vésuve $(Ca,Na^2)^3Al^2Si^3O^{12}$ est quadratique avec R. A. = 1 : 0,884.

Humboldtilite ou **Mélilite**. $(Ca,Mg,Na^2)^6(Al,Fe)^2Si^5O^{19}$. — P. S. = 2,90 à 2,95. — D. = 5 à 5,5.

S. quadratique; R. A. = 1 : 0,4548; $pb^1/_2$ = 147°15'. Clivage p parfait. Signe optique négatif. n_o = 1,631 à 1,634; n_e = 1,626 à 1,629.

Cette espèce, composée de 41 à 43. SiO^2, 11. Al^2O^3; 34. CaO, avec 6. MgO; 4,5. Na^2O; 0,4. K^2O et 4. Fe^2O^3, se trouve associée à la méionite dans les blocs calcaires de la Somma. On la trouve aussi d'une manière presque constante avec l'olivine et la perowskiste, dans des basaltes spéciaux, néphélinites, leucitites, etc. Elle est fréquente dans les scories des hauts fourneaux.

Blanche ou jaune de miel, elle fond lentement au chalumeau. Réact. 88.

Le signe optique est variable, le plus souvent négatif.

A la suite des grenats et des wernérites viennent se placer quelques silicates de métamorphisme qui ne contiennent pas d'alumine. Au premier rang est la Wollastonite.

Wollastonite. $CaSiO^3$. — P. S. = 2,78 à 2,91. — D. = 4,5 à 5.

S. monoclinique. R. A. = 0,966 : 1 : 1,114; mm = 95°35' à 95°39'; ph^1 = 110°12' (1).

Combinaison : $po^1/_2h^1a^3/_2a^1/_2e^1/_2m$. $po^1/_2$ = 129°42'. Macles fréquentes parallèles à p. Clivages p et $a^1/_2$ parfaits; h^1 et $o^1/_2$ moins faciles. En fibres, allongement habituel suivant ph^1.

Opt. Signe négatif. Dispersion inclinée. A. O. dans g^1; 2V = 40°. Biss. inclinée sur pg^1 de + 32°12'. n_g = 1,635; n_m = 1,633; n_p = 1,621. Incolore en lames minces. Couleurs de polarisation limpides et comme lavées.

Éclat vitreux; incolore, blanche, grise; difficilement fusible; donne avec le sel de phosphore un squelette de silice. Attaquée par les acides en faisant gelée, la Wollastonite (dédiée à Wollaston) est à la fois un élément accessoire

(1) M. Vom Rath prend la face p ainsi définie pour h^1, et choisit pour forme primitive un prisme mm de 87°18'. En fixant le rapport des axes à 1,053 : 1 : 0,484, la forme devient très voisine de celle du pyroxène, auquel la plupart des auteurs réunissent la wollastonite.

de certaines roches basiques, dolérites ou laves, où elle se présente en agrégats asbestiformes et en grains cristallins, et un élément métamorphipue des roches calcaires.

GENRE HUMITE

Le genre Humite comprend trois espèces minérales, en gisement dans les cipolins et les calcaires métamorphiques, dont l'une est rhombique (*humite*) et les deux autres monocliniques (*chondrodite* et *clinohumite*). La formule générale qui leur convient est $H^2(Mg,Fe)^{19}Si^8O^{34}F^4$. La proportion de fluor est de 3 à 10 %.

L'analogie cristallographique des trois espèces ressort bien du tableau suivant (1).

ESPÈCES	RAPPORT D'AXES	ANGLE *mm*	pg^1
Humite.	1,080 : 1 : 4,401	85°35′	90°
Chrondrodite	1,080 : 1 : 3,144	85°35′	90°
Clinohumite	1,080 : 1 : 5,659	85°35′	90°

Humite. — P. S. = 3,18 à 3,23. — D. = 6,5. Clivage *p*; grains ovoïdes. Incolore ou jaune, éclatante. Signe optique positif. A. O. dans *p*. Biss. normale à g^1.

Chondrodite. — Même composition (avec plus de fluor) et même signe optique que la humite. P. S. = 3,12 à 3.20. D. = 6 à 6,5. Symétrie monoclinique. Jaune, brune ou verte, avec éclat résineux. Se trouve en grains (d'où son nom, χόνδρος, grain) ou en cristaux arrondis dans le calcaire saccharoïde de la Finlande, notamment à Pargas, et en divers points des États-Unis. A. O. dans un plan normal à g^1, incliné de 30° sur *p*. $n_g = 1{,}639$; $n_m = 1{,}619$; $n_p = 1{,}607$.

Clinohumite de la Somma, en prisme monoclinique de 50°24′ : cristaux hémiédriques, jaunes ou blancs. A. O. dans un plan normal à g^1, incliné de 9° sur *p*. Même biréfringence que la Chondrodite.

Les trois espèces du genre humite sont solubles dans l'acide chlorhydrique.

Mallard considère les réseaux comme identiques. Le type rhombique serait dû à des macles submicroscopiques entre les humites monocliniques.

FAMILLE DES SILICATES HYDRATÉS

Au premier rang, parmi les silicates hydratés, non exclusivement argileux, qui doivent leur origine au métamorphisme, viennent se placer des espèces

(1) Lacroix, *Minéralogie de la France*, p. 119. Par dérogation aux règles habituelles, on a mis en avant l'angle aigu de la base rhombe de la humite.

qui résultent habituellement de la transformation des minéraux des roches basiques. La plus importante est l'Épidote.

Épidote. $H^2Ca^4(Al^2,Fe^2)^3Si^6O^{26}$. — P. S. = 3,32 à 3,5. — D. = 6 à 7. — 36 à 40. SiO^2; 18 à 29. Al^2O^3; 7 à 17. Fe^2O^3; 21 à 25. CaO; 0,1 à 2,5 de perte au feu.

S. monoclinique. R. A. = 1,581 : 1 : 1,806 (1); $mm = 70°$ (2); $ph^1 = 115°24'$. Combinaisons nombreuses; $ph^1a^1e^1$ (fig. 470); $ph^1a^1b^1/_2$ (fig. 471); la même

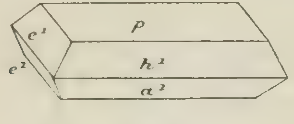


Fig. 470.

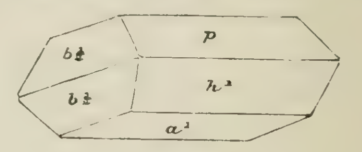


Fig. 471.

avec m (fig. 472). Principaux angles : $b^1/_2b^1/_2 = 109°35'$ sur g^1; $a^1h^1 = 128°18'$; $a^1/_2h^1 = 154°3'$; $a^1a^1/_2 = 154°15'$; $pa^1 = 116°18'$; $mb^1/_2 = 150°57'$ et $117°40'$.

Les cristaux sont presque toujours allongés et cannelés dans le sens de l'arête ph^1.

Macles fréquentes par hémitropie autour d'un axe normal à h^1. Dans ce cas, l'extrémité du cristal simple de la figure 472 étant représentée dans la figure 473, après la rotation on obtient l'aspect de la figure 474, où les deux faces $b^1/_2$ du haut forment un angle rentrant et les deux autres un angle saillant. Parfois le second cristal ne forme (fig. 475) qu'une mince lamelle hémitrope, au delà de laquelle apparaît la suite du premier cristal.

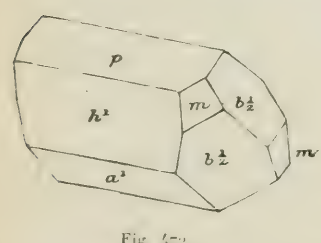


Fig. 472.

Clivages : p parfait; h^1 imparfait; cassure inégale.

Opt. Signe négatif. Propriétés optiques variables. A. O. dans g^1; le plus souvent, $2V = 75°$; $2H = 94°,1$. Dispersion inclinée. Dispersion des axes nulle (Des Cloizeaux). Cependant Rosenbusch admet [illegible] Biss. faisant avec la clinodiagonale un angle de — 60° à — 62°, c'est-à-dire presque parallèle à $h^1 g^1$. $n_g = 1,768$ (rouge); $n_m = 1,754$; $n_p = 1,730$. Maximum de biréfringence, 0,056. Teintes de polorisation limpides et lavées.

Verte, jaune, brune, noire; en général, le vert bouteille ou le vert pistache

(1) Ces données, acceptées par M. Zirkel, sont celles qui résultent des travaux de MM. Marignac et de Kokscharow. Mallard admet, pour le rapport des axes, la valeur 1,584 : 1 : 1,640, qui fait ressortir une symétrie-limite rhombique, car l'angle de l'axe vertical avec la base devient alors égal à 90°24'. La base p et les faces m sont les mêmes dans les deux manières de voir : mais la face h^1 devient $a^1/_2$ pour Mallard, a^1 se transforme en $o^1/_2$ et $b^1/_2$ devient $d^1/_4$. — (2) Des Cloizeaux donne 69°56', d'où résulte un rapport d'axes un peu différent. M. Michel-Lévy admet ce chiffre avec 1,583 : 1 : 1,815.

(*Pistazite* domine. Polychroïsme parfois énergique; vert émeraude à travers p; jaune à travers $a^{1/2}$ ou $a^{1}/_{3}$. Beaucoup de cristaux d'épidote, observés à la lumière naturelle à travers p, ou taillés normalement à un axe optique, laissent apercevoir des houppes d'interférence, sous la forme de deux hyperboles obscures.

Au chalumeau, se gonfle et s'arrondit en chou-fleur; les variétés foncées riches en fer sont facilement fusibles. A peine attaquable avant calcination.

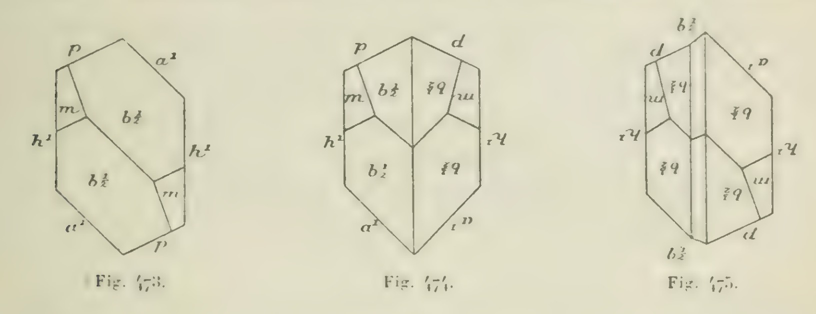


Fig. 473. Fig. 474. Fig. 475.

L'épidote se présente le plus souvent en groupes bacillaires, invariablement implantés par une face g^1, surtout dans les roches cristallines basiques. Elle est fréquente en Dauphiné (*Oisanite, Delphinite*), dans l'Oural (*Puschkinite, Achmatite*), en Scandinavie (*Arendalite, Acanthikon*), etc.

Dans les plaques minces, l'Épidote est remarquable par la vivacité de ses couleurs de polarisation. Les cristaux, allongés suivant ph^1, s'éteignent parallèlement à leur longueur.

Etym. : ἐπιδόσις, accroissement, à cause de la dilatation qu'a subie la zone ph^1.

Piémontite. $H^2(Ca,Mn)^4(Mn^2,Al^2,Al^2,Fe^2)^3Si^6O^{26}$. — P. S. = 3,4. — D. = 6,5.

La Piémontite possède la forme cristalline de l'Épidote (R. A. = 1,610 : 1 : 1,833; $mm = 69°$; $ph^1 = 113°21'$), dont elle n'est guère qu'une variété manganésifère, pouvant renfermer de 14 à 24 °/₀ d'oxyde manganique. Cependant son signe optique est positif. Couleur brun rouge ou rouge cerise. Facilement fusible. Réact. 47. Inattaquable. Se trouve à Saint-Marcel en Piémont, à Jacobsberg.

La *Withamite* est une piémontite qu'on trouve dans le porphyre rouge antique.

Zoïsite. $H^2Ca^4(Al^2)^3Si^6O^{26}$ — P. S = 3,22 à 3,36. — D. = 6.

S. rhombique. R. A. = 0,622 : 1 : 0,346; $mm = 116°16'$ à $117°5'$.

Ordinairement en prismes g^1, g^2, $g^1/_3$, h^3, h^2, h^1, m, sans sommets distincts. Clivage g^1 parfait. Signe opt. positif. A. O. tantôt dans g^1, tantôt dans p, avec angle 2H de 42° à 70°. Dans le premier cas, $\rho < v$; dans le second $\rho > v$. Biss. aiguë toujours normale à h^1. $n_g = 1,702$; $n_p = 1,696$.

La Zoïsite a exactement la composition de l'Épidote, sauf le fer. Mallard la regarde comme monoclinique, mais rendue rhombique par des macles répétées autour de l'axe vertical pseudo-binaire.

Grise, brune, verte et rose et dans ce cas très polychroïque (*Thulite*); poussière blanche.

Se gonfle un peu et fond avec bouillonnement; difficilement attaquable.

La Zoïsite se présente dans les roches basiques, amphibolites, diorites, éclogites, serpentines, etc., quelquefois aussi dans le granite et le micaschiste. Elle se forme également par altération du feldspath, en donnant naissance à ce qu'on a nommé la *Saussurite*. Tel est le cas des saussurites compactes du Mont-Genèvre, d'Orezza en Corse, etc. L'altération du plagioclase dans le porphyre rouge antique fait naître de la Thulite, qui détermine en partie la coloration de la roche, où se trouve aussi de l'Épidote rouge.

Etym. : Dédiée au baron de Zoïs.

Ilvaïte. $H^2Ca^2Fe^4Fe^2Si^4O^{18}$. — P. S. = 3,8 à 4,1 — D. = 5,5 à 6.

S. rhombique; R. A. = 0,66 : 1 : 0,443. mm = 112°38′; g^3g^3 = 73°45′; a^1a^1 = 112°49′ sur p: $b^1/_2b^1/_2$ adj. = 139°31′ et 117°27′. Combinaisons : $mb^1/_2a^1$. $mg^3a^1b^1/_2$. Clivages p et g^1 assez nets.

Opaque; éclat métalloïde; noir de velours ou de poix. Poussière noire. Magnétique. Fond facilement au chalumeau. Réact. 48. Réact. 64, avec squelette de silice, et 88. Soluble en gelée dans l'acide chlorhydrique. Signe optique positif. A. O. dans h^1. Biss. normale à p. Indice moyen : 1,76. Se trouve en cristaux et masses bacillaires à l'île d'Elbe (d'où son nom) et en d'autres gisements, souvent associée, d'une manière intime, à l'amphibole.

Werner avait donné à l'espèce le nom de *Liévrite*.

A la suite des espèces qui viennent d'être décrites, nous rangerons deux genres importants de minéraux formant des paillettes, les unes flexibles, mais non élastiques, les autres dépourvues à la fois de flexibilité et d'élasticité. Le premier genre est celui des *Chlorites*, le second celui des *Clintonites*. Dans la première édition de ce Cours, les Chlorites avaient été décrites à la suite des micas. Mais les travaux récents des lithologistes ont établi que, dans toutes les roches où les chlorites figurent comme éléments essentiels, ces minéraux sont toujours d'origine secondaire et doivent leur naissance, soit à un phénomène de décomposition atmosphérique, soit au métamorphisme, chimique ou mécanique. Rien n'est donc plus naturel que de les réunir aux Clintonites, auxquelles les Chlorites se relient d'ailleurs intimement par leur composition, comme par leur aspect extérieur, ainsi que le prouve le nom de *Chloritoïde*, justement appliqué à l'une des espèces du genre Clintonite.

GENRE CHLORITE

Le genre des *Chlorites* (χλωρός, vert), ou des paillettes flexibles, mais peu ou point élastiques, a été divisé en trois espèces principales, toutes trois vertes et essentiellement composées, ainsi que les variétés qui viennent s'y rattacher, de silice, alumine, magnésie, oxyde de fer et eau. Ces trois espèces, qui sont la Pennine, le Clinochlore et la Ripidolite, dérivent, selon Mallard, de la même symétrie monoclinique, avec forme limite pseudo-rhomboédrique. Les données cristallographiques seraient : R. A. $=$ 0,577 : 1 : 2,277 ; $ph^1 = 90°20'$. Les trois espèces auraient un clivage p très facile et présenteraient, par suite de croisements de lames, des variations très considérables dans leurs propriétés optiques. Ainsi la bissectrice aiguë, sensiblement perpendiculaire à p, est tantôt positive, tantôt négative. Les axes optiques, qui s'ouvrent dans g^1, y font entre eux un angle 2V, variable de 0° à 55°. Le signe optique et l'écartement des axes varient souvent dans un même cristal.

Le polychroïsme est constant dans les variétés colorées, qui se montrent d'un jaune pâle suivant la bissectrice et d'un vert pâle perpendiculairement à cette direction.

M. Tschermak distingue les *Orthochlorites*, en cristaux ou en lames définies, et les *Leptochlorites*, généralement écailleuses et ne montrant leur cristallinité qu'au microscope. Au premier groupe appartiennent les trois espèces suivantes :

Pennine. $H^{10}Mg^7Al^2Si^4O^{23}$ ou $H^8Mg^5Al^2Si^3O^{18}$. — 32,5. SiO^2 ; 14. Al^2O^3 ; 7. FeO ; 34,5. MgO ; 12. H^2O. — P. S. $=$ 2,61 à 2,84. — D. $=$ 2,5 sur le clivage ; 3 sur les autres faces.

Combinaison habituelle : $po^1b^1/_2$ (fig. 476), donnant aux cristaux l'apparence de rhomboèdres tronqués par a^1. La face de base est souvent triangulaire, d'où le nom de *mica triangulaire* donné à l'espèce par Haüy. L'angle du pseudo-rhomboèdre, formé par les faces $b^1/_2o^1$, est de 65°28'. Clivage très facile suivant la face p, généralement unie.

Opt. Réfr. de signe variable, le plus souvent négatif, avec Biss. normale à p. $n_g = 1,577$ ou 1,579 pour le rouge. $n_p = 1,576$. Les axes optiques, presque réunis, sont dans g^1. Dispersion forte. Polychroïsme marqué dans les variétés vertes : vert émeraude par transmission normale à p ; brun ou rouge hyacinthe pour les plaques parallèles à l'axe vertical.

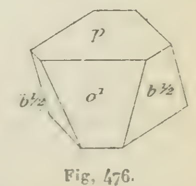


Fig. 476.

Éclat vitreux, vert noirâtre sur les faces des gros cristaux ; vert clair ou vert émeraude sur la base. Poussière onctueuse.

Ch. Réact. 23. — S'exfolie, blanchit et fond difficilement en émail grisâtre. La poudre fine s'attaque complètement, à la longue, par l'acide chlorhydrique bouillant.

La pennine est ordinairement associée, dans un chloritoschiste amiantoïde du Valais, au grenat et à l'idocrase. On la trouve aussi dans le schiste micacé grisâtre de la vallée de Binn ; à Ala (Piémont), elle accompagne le clinochlore et le diopside.

Etym. : Du nom des Alpes Pennines.

Clinochlore. $H^2Mg^6Al^2Si^3O^{19}$ ou $H^{10}Mg^9Al^2Si^3O^{19}$. — 30 à 33. SiO^2 ; 14 à 19. Al^2O^3 ; 32 à 35. MgO ; 0 à 1,7. Cr^2O^3 ; 1,4 à 6. FeO, Fe^2O^3 ; 11 à 12. H^2O. — P. S. = 2,65 à 2,78. — D. = 1,5 à 3.

Symétrie monoclinique dominante.

Combinaisons : $pd^1/_4 b^1/_2 b^5/_2 e^3/_4 g^1$; $pa^1 d^1 b^1/_2 e^3/_4$ $(d^1/_2 b^1/_2 g^1)$, $b^1/_2 b^5/_2 e^3/_4$ (1).

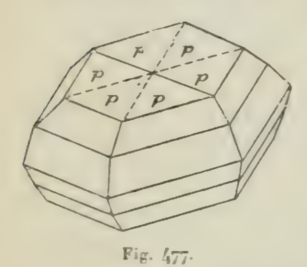


Fig. 477.

Macles fréquentes, notamment par pénétration de trois individus, en rosettes hexagonales (fig. 477). Clivage *p* très facile, non interrompu par les macles. Faces *p* miroitantes, quelquefois ondulées.

Opt. Signe le plus souvent positif. A. O. dans g^1 ; 2E variable de 11° à 86°. Bissectrice aiguë faisant avec la normale à *p* un angle très faible. Dispersion notable ; $\rho < v$. Dispersion inclinée peu sensible. Polychroïsme marqué pour les cristaux de l'Oural ; mêmes teintes que pour la pennine. $n_g = 1,596$; $n_m = 1,588$; $n_p = 1,585$.

Transparent en lames minces. Éclat vitreux, légèrement nacré sur les clivages, vert poireau ; vert clair (Ala) ; foncé (Oural, Tyrol). Poussière onctueuse.

Ch. Réact. 23. S'exfolie, blanchit et fond sur les bords en émail blanc jaunâtre ; se comporte comme la pennine avec l'acide chlorhydrique.

Le clinochlore (*chlorite hexagonale*), en cristaux ou en lames empilées, tapisse des druses et des fentes dans les chloritoschistes, souvent associé au grenat rouge et au diopside (Ala).

Le clinochlore est souvent enchevêtré avec la pennine, et les lames de clinochlore d'Ala offrent au centre un noyau uniaxe, entouré de bandes monocliniques, d'ailleurs peu homogènes.

Etym. : Le nom de clinochlore dérive du système cristallin de l'espèce.

Au clinochlore se rapportent plusieurs espèces ou variétés dont les principales sont : la *Tabergite* bleu verdâtre de Suède, la *Pyrosclérite* vert émeraude, chromifère, la *Serpentine d'Aker*, jaune et transparente, la *Chlorite talqueuse* de Traverselle en Piémont, la *Leuchtenbergite*, la *Corundophyllite*, la *Kæmmerérite*, la *Kotschubéite*, la *Chlorite de Mauléon*, etc.

(1) Ces notations correspondent à la forme primitive choisie par Mallard, qui note d^1 la face $b^1/_2$ de M. Zirkel et *m* de Des Cloizeaux ; alors $d^1d^1 = 125°37'$ et $pd^1 = 113°57'$ ant. $pa^1 = 105°55'$ adj. $e^3/_4 e^3/_4$ sur $g^1 = 143°32'$.

Ripidolite $H^{10}(Fe,Mg)^5Al^2Si^5O^{19}$. — P. S. = 2,78 à 2,96. — D. = 1 à 1,5.

La Ripidolite, dont la véritable forme cristalline n'est pas déterminable, forme des tables hexagonales, biselées par des faces arrondies, et très facilement clivables, dont la composition comprend : 25 à 28. SiO^2 ; 19 à 23. Al^2O^3 ; 15 à 29. FeO ; 13 à 25. MgO ; 9 à 12. H^2O.

Éclat vitreux ; vert poireau, vert olive, vert d'herbe ; poussière grise ou verdâtre. Signe optique le plus souvent positif.

La ripidolite cristallisée se compose presque toujours de lames hexagonales groupées en éventail ou en boules contournées, implantées, sur des cristaux d'adulaire ou de quartz, dans des fentes du gneiss. Les prismes tordus que forment les lamelles empilées constituent la variété *Helminthe* (que quelques auteurs rapportent au clinochlore).

La ripidolite cristallisée est bien plus rare que la variété écailleuse ou grenue (*Chlorite écailleuse*), qui forme la masse des chloritoschistes. Cette espèce fond difficilement sur les bords, au chalumeau, en émail noir magnétique, donne de l'eau dans le tube et est attaquable par l'acide chlorhydrique.

Etym. : ῥιπίς, *éventail*, à cause de la forme radiée des cristaux.

Les *Leptochlorites* comprennent un grand nombre de silicates hydratés d'alumine, de fer et de magnésie, en écailles vertes, souvent d'apparence hexagonale et de composition plus ou moins définie. Nous nous bornerons à citer la *Delessite* (dédiée à Delesse) ou *terre verte* de beaucoup de porphyres ; l'*Aphrosidérite*, qui contient 44 % d'oxyde ferreux ; la *Thuringite*, également ferreuse ; la *Stilpnomélane*, avec 46 %. SiO^2 ; 6. Al^2O^3 ; 35,5. Fe^2O^3 ; 1,7. MgO ; 8,6. H^2O ; la *Métachlorite* en masses lamellaires, etc.

Il convient de rappeler que M. Lacroix est disposé à ranger, avec les Leptochlorites, la *Glauconie*, dont il a été antérieurement question (1).

D'après la biréfringence, MM. Michel-Lévy et Lacroix répartissent les chlorites en trois groupes :

1° Biréfringence comprise entre 0,001 et 0,005 (Pennine, Ripidolite). Les couleurs de polarisation sont : bleu foncé, violet lilas, rouge de cuivre, jaune laiton et, vu le croisement de lamelles submicroscopiques, il est impossible d'obtenir une extinction complète. C'est à cette classe que se rapportent les chlorites produites par la décomposition du mica noir, de l'amphibole, etc.

2° Biréfringence voisine de 0,005 à 0,01 (Clinochlores).

3° Biréfringence voisine de 0,014 (Métachlorite, Delessite). En lamelles, en houppes ou en sphérolithes dans les vacuoles des roches basiques anciennes.

GENRE CLINTONITE

Dans ce genre se placent une série d'espèces où l'alumine, en proportion dominante, est associée au fer, à la magnésie et à la chaux. Toutes dérivent du

(1) Voir plus haut, p. 520.

métamorphisme de roches plus ou moins complexes, les unes schisteuses, les autres calcaires. Leur caractère est la tendance à former, au sein des roches encaissantes, des paillettes disséminées, analogues à celles des micas et des chlorites, mais dépourvues de toute flexibilité. M. Tschermak les a réunies sous le nom de *Clintonites*.

Toutes les Clintonites sont monocliniques et paraissent voisines, par beaucoup de leurs caractères, des micas, auxquels elles se relient par les Margarites. Mais leur dureté est beaucoup plus grande ; car elle varie de 4 à 7 ; quant à leur densité, elle est généralement supérieure à 3,5. Toutes sont optiquement négatives, avec Biss. sensiblement normale à p et une faible dispersion ; $\rho < \nu$. Polychroïsme assez faible. $n_g = 1,658$; $n_m = 1,657$; $n_p = 1,646$.

M. Tschermak (1) distingue parmi les Clintonites les sous-genres suivants :

1° CLINTONITES PROPREMENT DITES

Densité comprise entre 3 et 3,1 ; composition exprimée par le mélange isomorphe du silicate $H^4Ca^2Mg^2Si^6O^{24}$ avec l'aluminate $H^2CaMgAl^6O^{12}$; cette série comprend :

Seybertite (**Clintonite** *stric. sens.* de quelques auteurs). Les deux composants y sont dans le rapport 4 : 5. L'analyse donne 19. SiO^2; 40. Al^2O^3; 0,6. Fe^2O^3; 1,9. FeO ; 21. MgO ; 13. CaO ; 4,8. H^2O, plus 1,26 de fluor. — P. S. = 3,15. — D. = 5 à 5,5. En prismes d'apparence hexagonale ou en doubles pyramides. Clivage p facile. A. O. dans un plan normal à g^1. Brun rougeâtre ou rouge de cuivre. Infusible, attaquable par l'acide chlorhydrique. Engagée dans des calcaires avec serpentine.

Etym. : Dédiée à MM. Seybert et Clinton.

Brandisite. Les composants sont dans le rapport 3 : 4. Il y a seulement un peu plus de Fe^2O^3 et de H^2O, un peu moins de CaO et de MgO que dans la Seybertite. Prismes à six faces mg^1. Clivage p. Couleur vert céladon ou vert poireau. — P. S. = 3,01 à 3,06. — D. = 4,5 à 5 sur p ; 6 à 6,5 sur m. A. O. dans g^1. Infusible ; attaquable par l'acide sulfurique. Se trouve aussi dans un calcaire.

Etym. : Dédiée au comte Brandis.

Xanthophyllite. Composants dans le rapport 5 : 8. Lames hexagonales ayant les formes de la biotite. Jaune verdâtre pâle. Infusible ; difficilement attaquable. — P. S. = 3,04. — D. = 4,5 sur p ; 5,5 sur les parties anguleuses. Clivage p. A. O. dans g^1. Se trouve dans un schiste talqueux.

2° SÉRIE DU CHLORITOÏDE OU DE L'OTTRÉLITE

Composition exprimée par le mélange du silicate $H^2Fe^2Si^2O^7$ avec l'aluminate $H^2Al^4O^7$; densité comprise entre 3,4 et 3,55. Symétrie triclinique, très voisine

(1) *Zeitschrift für Krystallographie*, III, p. 496.

de la symétrie monoclinique et même hexagonale ($mt = 121°$). Presque isomorphe avec la biotite.

Clivage p parfait; moins facile suivant m et t. Couleur vert bleuâtre; très polychroïque, même en lames minces. Bissectrice positive, presque normale à p. Plan A. O. à peu près parallèle au plan bissecteur de l'angle obtus mt. $\rho > v$; dispersion horizontale énergique. $2V = 45°$. Indice : en moyenne 1,718; biréfringence : 0,015.

Tandis que, dans les chlorites, les lames parallèles à la base ne laissent pas voir de traces de clivages, on en observe souvent plusieurs systèmes entrecroisés dans les lamelles basiques des chloritoïdes.

Les variétés suivantes peuvent être considérées comme spécifiquement identiques (1) :

Chloritoïde ou *Chloritspath* (25. SiO^2; 41. Al^2O^3; 0,5. Fe^2O^3; 24. FeO; 3. MgO; 8. H^2O). — P. S. = 3,52 à 3,56. — D. = 6,5.

Lames planes ou contournées, vertes, difficilement fusibles, attaquables par l'acide sulfurique; dans le calcaire ou associé à l'émeri; également dans les schistes cristallins. Polychroïsme du jaune verdâtre au vert olive.

Masonite, en cristaux verts tabulaires, à peine magnésiens. — P. S. = 3,53. — D. = 6,5.

Sismondine, en masses feuilletées, noires, devenant vertes en lames minces, dans un schiste chloriteux du Piémont. C'est la variété la plus magnésienne (6 à 7 %). — P. S. = 3,56. — D. = 5,5. A peine fusible; attaquable.

Etym. : Dédiée à Sismonda.

Ottrélite, en prismes tabulaires arrondis, gris noirâtres, verts par transparence, ou en lamelles d'un vert foncé, dans les schistes des Ardennes (43. SiO^2; 29. Al^2O^3; 3. Fe^2O^3; 12. FeO; 6. MnO; 2. MgO; 5. H^2O, soit $H^2(Fe, Mn, Mg)(Al^2Fe^2)Si^2O^9$). P. S. = 3,3. — D. = 6.

Etym : Ottrez en Belgique.

Phyllite de Thomson et de Hunt, en lames courbes et agrégats sphéroïdaux, dans les schistes anciens.

Dans cette série se range encore la **Venasquite** des Pyrénées.

A la suite des Clintonites, nous décrirons une espèce, ou plutôt un genre, celui des *Margarites*, que beaucoup d'auteurs ont classées avec les micas, dont elles formeraient le type calcaire. Mais, à l'exemple de M. Tschermak, il paraît plus à propos de les attribuer aux clintonites, avec lesquelles elles partagent la propriété de former des lamelles un peu cassantes, et plus dures que celles des micas. On les observe surtout dans les schistes métamorphiques avec

(1) Lacroix, *Bull. Soc. minér.*, IX, p. 42.

corindon. Leur formule est $H^2CaAl^4Si^2O^{12}$, et la symétrie est plus nettement monoclinique que dans les micas. On a tantôt $\rho > v$, tantôt $\rho < v$.

La **Margarite** proprement dite (P. S. = 2,99 à 3,1. — D. = 3,5 à 4,5), ainsi nommée de son éclat, qui rappelle celui des perles, est blanche ou grise, inattaquable par l'acide chlorhydrique et difficilement fusible au chalumeau. La Biss. est négative et s'écarte de 6° à 8° de la normale à *p*. Indice : 1.75. Biréfringence : 0,009. La proportion de chaux va de 10 à 11 %.

L'*Emerylite* et la *Corundellite* sont des margarites.

Peut-être faut-il énumérer ici une autre substance très difficile à classer, qui se présente en lamelles d'un brun doré, d'apparence hexagonale, nettement allongées suivant une direction, dans les syénites éléolitiques. C'est :

L'Astrophyllite. — P. S. = 3,3 à 3,4. — D. = 3,5.

S. rhombique. R. A. = 1,01 : 1 : 4,75, *mm* = 90°34′. Clivage g^1 parfait, *p* difficile. Lamelles jaune foncé, allongées suivant pg^1. A. O. dans *p*. Biss. positive normale à h^1; n_p presque perpendiculaire à g^1. 2 V = 75°. Biréfringence : 0,055.

L'Astrophyllite est un silicate titanifère avec alcalis, pour lequel M. Brögger a proposé la formule

$$(H, Na, K)^4 (Fe, Mn)^4 (Ti, Zr) Si^4 O^{16}.$$

La potasse et la soude y entrent à peu près pour 8 %.

GENRE SERPENTINE

Dans le genre *Serpentine*, nous comprenons tous les silicates hydratés de magnésie, depuis ceux qui ont des formes cristallines définissables jusqu'aux masses amorphes, qui ne prennent de facettes que quand elles se substituent par pseudomorphose à d'autres cristaux.

Talc. $H^2Mg^3Si^4O^{12}$. — P. S. = 2,6 à 2,8, — D. = 1 à 1,5.

Le talc, qui contient 62 a 63. Si O^2; 32 à 33. MgO et 4,7 à 4,9. H^2O, se présente en lames minces hexagonales, qui paraissent dériver d'un prisme rhombique ou monoclinique de 120°. Clivage *p* facile. Axes optiques dans h^1. Bissectrice négative, normale à *p*; 2V = 7°. Indice : 1,55. Biréfringence : 0,035 à 0,050. Éclat nacré; bleu, vert, gris, quelquefois argenté par réflexion. Onctueux; sectile : se laisse rayer par l'ongle. Au chalumeau, jette un vif éclat, devient dur, s'exfolie et fond difficilement sur les bords. Réact. 80. En partie attaquable par ébullition prolongée.

En lames souvent très courbes, disséminées dans les chloritoschistes, diorites, serpentines, calcaires cristallins, dolomies, etc.

Le talc offre, en plaques minces, des couleurs de polarisation très vives, où dominent le jaune et le rouge. On le distingue des micas blancs par les réactions microchimiques, qui décèlent l'absence de l'alumine.

La *pierre ollaire* est un mélange de talc, de chlorite, de mica et d'asbeste, formant des couches puissantes dans les terrains anciens.

La **Stéatite** est un talc compact ou granulaire, de couleur grise, vert grisâtre, blanche, jaune ou rougeâtre, qui noircit d'abord au chalumeau, puis blanchit et fond sur les bords. La *craie de Briançon* en est une variété d'un blanc laiteux.

C'est à la stéatite que doivent être rapportées une partie des substances (*Pagodite, Lardite*, etc.) avec lesquelles les Chinois sculptent des figurines.

Magnésite. $H^8Mg^2Si^3O^{12}$. — P. S. = 1,2 à 1,6. — D. = 2,5.

La *Magnésite* ou *Ecume de mer* renferme 55 à 60. SiO^2; 24 à 26. MgO; 12 à 21. H^2O. Elle est compacte, opaque, terne, blanche, laissant un trait brillant et happe à la langue. Se comporte au chalumeau comme la stéatite. Décomposée par l'acide chlorhydrique. Elle est souvent pénétrée par du carbonate de magnésie et accompagnée de calcédoine ou de cacholong. Biss. négative normale aux lamelles du clivage facile basique.

Une variété rouge carmin, nommée *Quincyte*, se trouve, avec quartz résinite de même couleur, à Quincy (Cher), dans un calcaire tertiaire. Sa couleur est attribuée à une matière organique.

Près de la Magnésite et du Talc vient se ranger :

Serpentine. $H^4Mg^3Si^2O^9$.

On a cru pendant longtemps que tous les minéraux connus sous le nom de Serpentine étaient des produits d'altération, ayant pris naissance, le plus souvent, aux dépens du péridot olivine, mais à la genèse desquels l'enstatite, le pyroxène et l'amphibole auraient aussi contribué. Ainsi se seraient formées des masses verdâtres, vert bleuâtre ou brun jaunâtre, parfois incolores et translucides, à structure tantôt schisteuse et feuilletée, tantôt fibreuse, tantôt amorphe, à cassure conchoïdale, esquilleuse ou inégale, n'offrant d'autres formes cristallines que celles des minéraux aux dépens desquels la pseudomorphose s'était opérée.

Cette manière de voir a dû être modifiée le jour où M. Georges Friedel, étudiant des échantillons à clivages cubiques, qui provenaient de la mine

Tilly-Foster (New-York), a fait voir (1) qu'on devait les considérer comme de la serpentine cristallisée.

Adoptant cette vue, M. Lacroix (2) juge nécessaire de distinguer, dans la serpentine, plusieurs types distincts, différant les uns des autres par leurs propriétés optiques.

Les deux premiers sont cristallisés. Mais tandis que l'*Antigorite*, en cristaux distincts pseudo-cubiques ou en masses fibro-lamellaires, allongées suivant n_g, est de signe *négatif*, le *Chrysotile*, en fibres de même allongement, est positif.

Antigorite. — P. S. = 2,55 à 2,58. — D. = 3 à 4.

S. rhombique (pseudo-cubique). Faces p, h^1, g^1. Groupements complexes. Clivage micacé h^1, g^1 et p faciles. Généralement verte; parfois translucide. A. O. dans g^1. Biss. négative perpendiculaire à h^1. 2E = 110°. Biréfringence inférieure à 0,009. Polychroïque en lames épaisses.

Difficilement fusible sur les bords avec réaction du fer. Plus ou moins facilement attaquable par les acides.

43. SiO^2; 44,1. MgO; 12,9. H^2O.

Les individus à clivages cubiques (Tilly-Foster et Moncamp dans la Haute-Garonne) sont constitués par des solides rectangulaires en marqueterie, où se croisent à angle droit les allongements suivant n_g et ceux suivant n_p.

La *Bastite* est une antigorite lamellaire, qui dérive toujours de l'Enstatite (*Protobastite*) ou de la Bronzite, et forme des lames, à reflets métalloïdes (d'où le nom de *Schillerspath*) d'un brun tombac ou jaune de laiton. Sa dureté peut atteindre 4. La *Marmolite* en est voisine, tandis que la *Baltimorite* est en masses fibro-lamellaires. La *Williamsite*, vert pomme, fortement translucide et monoréfringente par suite de l'enchevêtrement de ses parties, et la *Bowénite*, sont des antigorites en masses à aspect compact. La *Bowlingite* est regardée par M. Lacroix comme une antigorite ferrifère. Enfin la *Picrosmine*, à structure fibro-lamellaire, possède des propriétés optiques semblables à celles de l'Antigorite, bien que la composition soit différente et exprimée par $H^2Mg^2Si^2O^7$.

Ce qu'on appelle proprement la *Serpentine* compacte est une roche plutôt qu'un minéral. A cassure conchoïdale ou esquilleuse, elle est parfois translucide (*Serpentine noble*); sa couleur est le vert de diverses nuances, plus rarement le jaune vif; le plus souvent, les oxydes de fer lui impriment une marbrure de rouge ou de noir. Toujours elle est le résultat d'une pseudomorphose, généralement opérée aux dépens des péridotites. Mais, selon M. Lacroix, l'élément essentiel, souvent même exclusif, de ces roches, est l'*antigorite*.

D'éclat faible, résineux ou gras, la substance a un trait brillant, une pous-

(1) *Bull. Soc. minéral.*, 1891, p. 120. — (2) *Minéralogie de la France*, I, p. 419.

sière blanche et se laisse parfois couper au couteau. Elle blanchit et fond difficilement au chalumeau.

La *Saponite* ou *Pierre de Savon* de la serpentine de Cornouailles (qu'il ne faut pas confondre avec la Saponite de Plombières) se rattache à ce groupe.

Chrysotile. P. S. = 2,36 à 2,52. — D. = 2 à 3.

Ce minéral, de même composition que l'Antigorite, est, dans sa forme typique, en fibres soyeuses, dont il est possible d'extraire des fils aussi flexibles que ceux de l'amiante. Généralement jaune d'or ou verdâtre.

De signe positif, avec allongement des fibres suivant n_g, c'est-à-dire parallèlement à h^1g^1, il a ses axes optiques dans g^1, où leur angle apparent varie de 0° à 35°. La biréfringence dépasse 0,01.

La *Métaxite* est un chrysotile à grosses fibres. La *Picrolite* forme des sphérolithes elliptiques, en veines ou enduits dans la serpentine ordinaire; le *Xylotile* est fibreux, compact, et se divise à la manière du bois. C'est un chrysotile très ferrugineux et en partie privé de son fer.

C'est aussi à la même espèce que se rapportent la *Deweylite*, dont l'aspect rappelle la gomme arabique (ce qui lui a fait donner le nom de *Gymnite*). Enfin M. Lacroix y rattache la *Nouméite* ou *Garniérite*, hydro-silicate de magnésie contenant de 2 à 45 % de nickel, et qui dérive de serpentines.

La *Rétinalite*, la *Schweitzérite*, la *Vorhausérite*, la *Jenkinsite*, la *Cérolite*, sont des variétés de serpentine. Les serpentines colloïdes sont souvent imprégnées d'opale (*Siliciophite*, produit d'altération du péridot).

Le mélange de veines calcaires avec la serpentine commune constitue le *marbre vert antique*.

Le fer chromé, qui pénètre souvent la serpentine, lui donne quelquefois l'apparence d'une peau de serpent (d'où le nom de l'espèce).

Nous résumerons, dans le tableau suivant, la classification que nous avons adoptée pour tout le groupe des silicates.

Tableau résumé de la classification des silicates ou éléments des roches fondamentales.

SILICATES DES ROCHES ACIDES.	SILICATES ESSENTIELS.	**Famille de la Silice**	(Quartz, Quartzine, Opale, Tridymite.)	
		Famille des Feldspaths	GENRE FELDSPATHIDE.	
			— FELDSPATHOÏDE.	
		Famille des Micas	— BIOTITE.	
			— PHLOGOPITE.	
			— MUSCOVITE.	
	SILICATES ACCESSOIRES.	**Silicates des Granites et des Gneiss**	(Cordiérite, Sphène.)	
		— des Pegmatites	(Tourmaline, Topaze, Emeraude, etc.)	
		— des Syénites éléolitiques	(Zircon, Orthite, Cérérite, etc.)	
SILICATES DES ROCHES BASIQUES.	SILICATES ESSENTIELS.	**Famille des Pyroxènes et des Amphiboles.**		
		Famille du Péridot.		
	SILICATES DES AMYGDALES ou ZÉOLITES.	**Zéolites sodiques.**		
		— sodico-calciques.		
		— calcico-potassiques.		
		— à base de chaux, potasse et soude.		
		— calcifères.		
		— barytiques.		
SILICATES DE MÉTAMORPHISME.	SILICATES D'ALUMINE.	**Silicates anhydres**	(Andalousite, Disthène, etc.)	
		— hydratés	GENRE ARGILE.	
	SILICATES NON EXCLUSIVEMENT ALUMINEUX.	**Silicates anhydres ou peu hydratés**	GENRE GRENAT	*Grenats alumineux.*
				— *ferreux.*
				— *chromifères.*
			— WERNÉRITE.	
			— HUMITE.	
		Silicates hydratés	Épidote, etc.)	
			GENRE CHLORITE.	
			— CLINTONITE.	
			— SERPENTINE.	

TROISIÈME SECTION

DESCRIPTION DES MINÉRAUX DU DEUXIÈME GROUPE OU ÉLÉMENTS DES GITES MINÉRAUX

PREMIER ORDRE

OXYDES ET OXYSELS NON MÉTALLIFÈRES

OXYDES

Glace. H^2O. — P. S. = 0,918 (à 0° C.) — D. = 1,5. — S. hexagonal. R. A. = 1 : 1,4.

La glace se présente en tables hexagonales minces, maclées parallèlement à *m* et la neige offre un grand nombre de figures étoilées, produites par des groupements de cristaux maclés. Clivage *p*. Éclat vitreux. Double réfraction positive, mais faible. Indice moyen : 1,309.

A l'état de névé, puis de glace de glacier, la glace est en grains cristallins, dont chacun a son orientation optique, mais qui peuvent grossir par adjonction d'individus adoptant la même orientation.

Sassoline. $H^6B^2O^6$. — P. S. = 1,48. — D. = 1,0. — S. triclinique : — R. A. = 0,577 : 1 : 0,528. *mt* = 118°30′ ; *mp* = 84°57′ ; *tp* = 99°17′.

La sassoline ou acide borique hydraté (43,6. H^2O) forme de petites tables, d'apparence hexagonale, $pmte^1i^1b^1/_2c^1/_2d^1/_2f^1/_2$, ou des masses stalactitiques écailleuses. Clivage *p* net. Blanche, grise, ou jaunâtre (avec soufre mélangé). Éclat nacré. Saveur acide. Soluble dans l'eau et l'alcool. Fusible. Réact. 16,23. Se trouve dans les Lagoni de la Toscane, notamment à *Sasso*, ainsi qu'à Wiesbaden, en Californie, au Stromboli, etc.

Périclase. MgO. — P. S. = 3,67. — D. = 6. — S. cubique.

Ce minéral, à éclat vitreux, d'un gris verdâtre passant au vert foncé, se présente en grains octaédriques qui se clivent nettement et facilement, sur tous

les angles, suivant p, d'où le nom de l'espèce, dérivé de περί, autour. Le chalumeau ne la modifie pas. Réact. 80 et 108. Humectée d'eau, offre une réaction alcaline. Soluble dans les acides; se trouve dans les blocs de dolomie de la Somma.

Brucite. H^2MgO^2. — P. S. = 2,3 à 2,4. — D. = 2,5. — S. rhomboédrique; R. A. = 1 : 1,521. pp. = 82°22'.

Combinaison habituelle : pa^1, en cristaux tabulaires. Blanche ou verdâtre; éclat vitreux ou cireux, nacré sur le clivage très facile a^1. Sectile.

Double réfraction positive. $n_o = 1,559$; $n_e = 1,579$. Émet des lueurs vives, sans fondre, au chalumeau. Réact. 23, 80, 108. Soluble dans les acides.

Se trouve dans la serpentine et dans certains calcaires.

Etym. : Dédiée au minéralogiste américain Bruce.

GENRE TITANOXYDE

Rutile. TiO^2. — P. S. = 4,27. — D. = 6 à 6,5. — S. quadratique R. A. = 1 : 0,911 (1).

Principales combinaisons : $h^2 a^1$; $h^1 b^1$; $m h^2 h^1 a^1 b^1$ (fig. 478); $m h^1 b^1$; $m h^1 h^2 h^3 a^1 b^1$; etc.

Angles : $m h^2$ = 153°26'; $a^1 h^2$ = 129°43'; $a^1 a^1$ adj. = 123°8' sur b^1; a^1 a^1 sur p = 95°20'; pb^1 = 147°13'.

Macles fréquentes, suivant b^1, entre cristaux géniculés sous un angle de

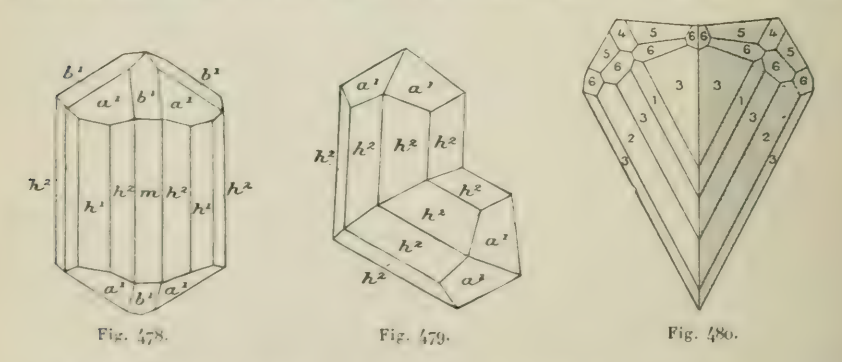


Fig. 478. Fig. 479. Fig. 480.

114°26' (fig. 479), cette macle, dite en *genou*, pouvant se répéter sur cinq individus. Une autre macle, avec accolement suivant $b^1/_3$, abondante surtout à l'état microscopique, produit des cristaux en fer de lance ou *en cœur* (fig. 480). L'angle saillant est de 77°48'. Clivages : m parfait; h^1 moins facile; M. Baum-

(1) Plusieurs auteurs donnent 1 : 0,644, ce qui revient à permuter m avec h^1. Dans cette manière de faire, la notation de la figure 469 s'obtiendrait en faisant 1 = h^1; 2 = m; 3 = h^3; 4 = a^1; 5 = $b^1/_2$; 6 = a_2; tandis que, avec le rapport que nous adoptons, il faut faire 1 = m; 2 = h^1; 3 = $h^1/_3$; 4 = b^1; 5 = a^1; 6 = $b^1 b^1{}_3 h^1{}_2$.

hauer a signalé (1), dans le rutile de la vallée de Binn, une macle formée par douze cristaux, qui s'accolent tour à tour suivant les faces de b^1 et de $b^1/_3$, et remplissent ainsi presque exactement tout l'espace, en simulant à l'extérieur un prisme dihexagonal à angles alternativement plus ou moins obtus. On connaît aussi des groupements de huit individus autour d'une arète de b^1. Cassure conchoïdale. Double réfraction énergique, positive. Éclat adamantin, inclinant au métallique; brun rougeâtre, rouge, jaune; noir (quand il contient du fer); poussière gris brunâtre.

Opt. Signe positif. Polychroïsme sensible. $n_e = 2,841$ à $2,982$; $n_o = 2,567$ à $2,672$.

Sans changement au feu du chalumeau. Réact. 69, surtout avec l'étain. Soluble dans les acides, après fusion avec alcali ou carbonate alcalin.

Cristaux fréquemment aciculaires et pénétrant des masses de feldspath ou de quartz; forme quelquefois dans le quartz des filaments d'un blond doré ou *cheveux de Vénus* (*Sagénite*) Quelquefois implanté, en petits cristaux rouges aplatis ($mh^3h^2a^1b^1a^1/_2$), sur de l'oligiste, une des faces m du rutile s'appliquant sur la face a^1 de l'oligiste.

Le rutile abonde dans certains schistes métamorphiques et se trouve en inclusions dans beaucoup de micas, à l'état de petits prismes allongés suivant la zone positive mm et parallèles ou perpendiculaires aux faces m et g^1 de leur hôte. Même en lame très mince, il ne présente pas de teintes de polarisation, tant est grande sa biréfringence (0,2871). Son relief dans les plaques est considérable.

Etym. : Nommé Rutile à cause de sa couleur rutilante.

Anatase. TiO^2. — P. S. = 3,83 à 3,93. — D. = 5,5 à 6.

S. quadratique. R. A. = 1 : 3,554 (environ quatre fois le paramètre du rutile); $pb^1 = 111°42'$; b^1b^1 sur $p = 43°24'$; b^1b^1 adj. $= 97°51'$ (2). Combinaisons : b^1; b^1b^5 (fig. 481).

Faces généralement nettes et unies. Clivages nets p et b^1. Cassure conchoïdale.

Opt. signe négatif. $n_o = 2,513$ à $2,554$; $n_e = 2,476$ à $2,496$. Anomalies optiques.

Éclat adamantin, submétallique. Bleu indigo; noire, jaune de miel, etc. Infusible et phosphorescente au chalumeau. Réact. 69.

Fig. 481.

En cristaux généralement très petits, implantés dans les fentes des gneiss, micaschistes, etc.; souvent avec quartz, albite, épidote et chlorite (Oisans).

Etym. : ἀνάτασις, allongement, parce que son octaèdre est généralement aigu. Nommée aussi *Octaédrite*.

(1) *Congrès scientifique de Fribourg* en 1897. — (2) Il y a des auteurs qui admettent R. A. = 1 : 1,777 : alors notre b^1 devient $b^1/_2$.

La *Wisérine* du Binnenthal, longtemps considérée comme un phosphate d'yttrium et de cerium, n'est qu'une variété jaune-miel d'Anatase, qui se dissout complètement dans les acides.

Brookite. TiO^2. — P. S. = 3,87 a 4,08. — D. = 5,5 à 6.

S. rhombique. R. A. = 0,842 : 1 : 0,472 ; mm = 99°50′ ; $b^1/_4 b^1/_4$ = 115°43′ (1). Traces de clivages m et p. Couleur brun jaunâtre, brun rougeâtre, rouge hyacinthe, avec éclat adamantin ; poussière blanc jaunâtre. La variété *Arkansite* est gris noir avec poussière gris de cendre. Au chalumeau, sur le charbon, prend l'aspect d'un fragment de tôle de fer. Généralement associée à l'anatase, en tables aplaties suivant h^1 (Oisans), très minces et allongées suivant l'axe vertical, avec e_2 et e_3 en bordure.

Opt. Signe positif. A. O. tantôt dans g^1, tantôt dans p. Dans le premier cas, $\rho < v$; dans le second $\rho > v$. Biss. normale à h^1. Certaines plages sont à un axe en lumière verte et à deux axes en lumière rouge. 2V variable de + 53° à 33°. Indice : 2,637.

Etym. : Dédiée au minéralogiste Brooke.

Nous ne reviendrons pas ici sur ce que nous avons dit (2) du trimorphisme de l'oxyde de titane TiO^2 et sur l'explication qu'en a donnée Mallard, par des groupements d'individus monocliniques à symétrie-limite quadratique. Rappelons seulement que, dans l'anatase de Diamantino (Brésil), M. É. Bertrand (3) a reconnu des octaèdres intérieurement pseudomorphosés en aiguilles de rutile.

M. Hautefeuille a constaté que, dans la reproduction artificielle des oxydes de titane par la vapeur d'eau agissant sur les chlorures ou les fluorures, le rutile se formait au rouge, la brookite entre la chaleur de volatilisation du zinc et celle du cadmium, et l'anatase un peu au-dessous de ce dernier point

GENRE ALUMINOXYDE

Corindon. Al^2O^3. — P. S. = 3,93 à 4,08. — D. = 9.

S. rhomboédrique. R. A. = 1 : 1,363 ; pp = 86°4′.

Combinaisons : d^1 ; d^1a^1 ; d^1e_3, avec un autre isocéloèdre plus aigu (fig. 482), de notation $\{b^1/_3 d^1 d^1/_5\}$ = $(44\bar{8}3)$ = $(51\bar{3})$; $d^1a^1pe_3$. Trois faces alternantes d'un isocéloèdre prédominent souvent sur les trois autres. Clivages p et a^1, sensibles seulement sur les gros échantillons ; stries triangulaires sur a^1.

Cassure très variable. Éclat vitreux, nacré ou bronzé.

Opt. négatif. n_o = 1,789 (jaune) ; n_e = 1,760. Anomalies optiques, conduisant à regarder l'espèce comme pseudo-rhomboédrique, avec plan A. O.

(1) Ce rapport d'axes diminue de moitié le paramètre vertical (0,944) admis par divers auteurs, pour qui notre $b^1/_4$ deviendra $b^1/_2$. — (2) Voir plus haut, p. 373. — (3) *Bull. Soc. minér. de France*, 1879, p. 30.

perpendiculaire à l'un des côtés de l'hexagone d^1 et Biss. Normale à a^1 : offre quelquefois le phénomène de l'astérisme, dû à des aiguilles de rutile. Coloration variable. Quand elle existe, polychroïsme parfois très marqué : par exemple image ordinaire bleue, image extraordinaire d'un vert de mer. Contient généralement 0 à 8 d'oxyde de fer, 0 à 1 de chaux, 0 à 4 de silice et 0 à 3 d'eau.

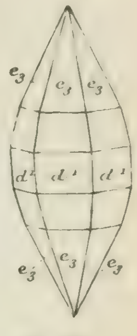


Fig. 482.

Infusible, insoluble. Très électrique par frottement.

Le corindon, que sa dureté place immédiatement après le diamant, fournit des gemmes très estimées et de couleurs variées. Il est bleu dans le *Saphir* proprement dit ou *S. oriental* (lequel, d'après Sorby, contient souvent de nombreuses inclusions d'acide carbonique liquide); rose dans le *Rubis* (*R. oriental*); jaune (*Topaze orientale*); vert (*Emeraude orientale*); violet (*Améthyste orientale*); incolore (*Saphir blanc*). La coloration peut varier beaucoup dans le même échantillon. On l'attribue à des traces de chrome ou de fer. Le saphir se décolore par l'action de la chaleur; mais le rubis, devenu vert à chaud, reprend sa couleur en se refroidissant.

Se rencontre dans le granite, le basalte, les chloritoschistes, les dolomies, les sables diamantifères, etc.

La dureté du corindon fait que, dans les plaques minces, il reste plus épais que les minéraux englobants, ce qui lui donne un relief sensible. On y observe de nombreuses inclusions gazeuses et liquides; dans ces dernières, on a pu constater la présence de l'acide carbonique liquéfié.

Etym. : **Karund** ou **Korund**, nom indien.

L'*Emeri* est un mélange de petits grains bleus microscopiques de corindon avec des quantités très variables de magnétite. M. Tschermak, dans l'émeri de Naxos, a trouvé 50 à 52 % de corindon, 32 à 33 de magnétite, 9 à 11,5 de tourmaline, avec chloritoïde, muscovite et margarite. L'analyse donne 44 à 84 %. Al^2O^3; 8 à 50. oxyde de fer; 1 à 6. SiO^2. Sa dureté le fait employer pour le polissage.

Le **Diaspore** est un hydrate d'alumine, $H^2Al^2O^4$, à 14 ou 15 % d'eau. P. S. = 3,3 à 3,5. — D. = 6. S. rhombique; R. A. = 0,468 : 1 : 0,302 (1). $mm = 129°47'$; b^1b^1 adj. = 151°34'. Tables mb^1g^1, aplaties suivant g^1, à clivage facile g^1. Incolore ou jaunâtre, violacé, verdâtre, transparent.

Opt. — Signe positif. A. O. dans g^1; Biss. normale à h^1. Dispersion faible, $\rho < v$. $2V = 84$ à $85°$; $n_g = 1,750$; $n_m = 1,722$; $n_p = 1,702$. Couleurs de polarisation vives et limpides. Trichroïsme accentué, disparaissant en plaque mince. Se trouve dans les schistes métamorphiques à corindon. Une variété du dia-

(1) D'autres auteurs donnent 0.937 : 1 : 0.604, ce qui change notre m en h^3 et b^1 en $b^1 b^{1/3} h^{1/2}$.

spore décrépite au chalumeau ; n'abandonne son eau qu'au rouge blanc ; infusible et inattaquable. Réact. 81.

Etym. : διασπείρω, je décrépite. — M. Lacroix a trouvé du diaspore, avec corindon, grenat et quartz, dans une granulite rejetée par le volcan de la Denise.

L'**Hydrargillite** est un hydrate d'alumine $H^6Al^2O^6$, rhombique ou même monoclinique, mais pseudo-hexagonal. — P. S. = 2,34 à 2,39. D. = 2,5 à 3. — Clivage *p* facile. Infusible. Réact. 81.

Nous ne pouvons pas séparer des hydrates d'alumine la **Beauxite** ou **Bauxite**, signalée pour la première fois par Berthier aux Beaux, près d'Arles. Cette substance, très variable de composition, renferme 40 à 55. Al^2O^3 ; 27 à 33. Fe^2O^3 et 20 à 24. H^2O. Les uns la considèrent comme un hydrate d'alumine $H^4Al^2O^5$, où le fer remplace l'aluminium par isomorphisme. D'autres n'y voient qu'un mélange mécanique d'argile avec des grains de peroxyde de fer. Cependant il y aurait en Carniole une bauxite formée par un véritable hydrate d'alumine, avec très peu de silice et de fer.

La Bauxite paraît être un produit spécial d'altération des roches granitoïdes sous l'influence d'un climat tropical.

Blanchâtre, grisâtre ou rougeâtre, en gros grains ou en masses pisolithiques, difficilement attaquée par l'acide chlorhydrique, la Bauxite est employée comme minerai d'aluminium. — P.S. = 2,55.

GENRE URANOXYDE

Pechurane ou **Pechblende**. U^3O^4 ou U^5O^{12} — P. S. = 7 à 9. — D. = 5 à 6.

S. cubique : formes *p*, a^1b^1. Le plus souvent en masses mamelonnées, grises ou d'un noir de poix (d'où le nom de l'espèce). Infusible. Réact. 52. Soluble dans l'acide nitrique à chaud. Se trouve dans les mines de Saxe, de Bohême, de Cornouailles ; s'emploie dans l'industrie des émailleurs.

La Pechblende est le principal, sinon l'unique minerai du radium.

La **Gummite**, en grains amorphes, jaunes ou d'un brun rougeâtre, rappelant l'aspect de la gomme, avec 4 %. SiO^2, 6 %. CaO et 15 %. H^2O, est un oxyde d'urane hydraté, provenant de l'altération du Pechurane.

ALUMINATES

Cymophane. Gl Al^2O^4. — P.S. = 3,5 à 3,84. — D. = 8,5.

S. rhombique. R.A. = 0,580 : 1 : 0,470 (1) ; mm = 119°46′ ; $pb^{1/2}$ = 136°52′ ; $b^{1/2}b^{1/2}$ = 107°29′ sur *m*.

(1) Les auteurs qui permutent l'axe vertical avec le premier axe horizontal font de notre prisme *mm* la forme e^1, et leur prisme devient de 129°39′, $b^{1/2}$ demeurant le même.

Clivage g^1. Cristaux d'apparence hexagonale, par suite de macles suivant g^2 (fig. 483), entre six individus offrant la combinaison $pb^1/_2e_3\ g^1$. Ces macles sont surtout fréquentes dans la variété *Alexandrite*, d'un vert foncé, devenant rouge framboise à la lumière transmise.

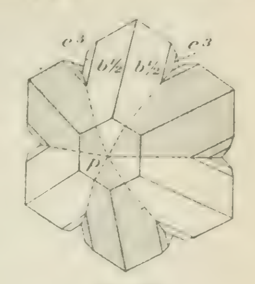


Fig. 483.

Opt. Signe positif. Biss. normale à h^1. A. O. dans g^1. $\rho > v$. $2V = 44°$; $n_g = 1,756$; $n_m = 1,748$; $n_p = 1,747$. Polychroïque, mais pas en lame mince.

Éclat vitreux; couleur vert d'asperge, vert d'herbe, vert émeraude, jaune verdâtre. Transparente ou translucide. Cassure conchoïdale, inégale. Infusible. Réact. 82. Inattaquable.

Etym. : κῦμα, vague, et φαίνω, je parais, à cause de l'opalescence de certains cristaux. Nommée aussi *Chrysobéryl* ou béryl doré.

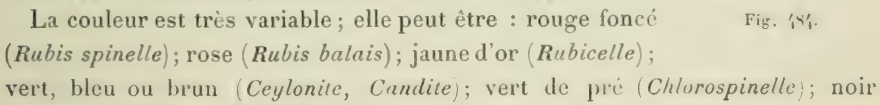
GENRE SPINELLE

Spinelle. $MgAl^2O^4$. — P. S. = 3,5 à 4,1. — D. = 8.

S. cubique. La forme dominante est a^1. On observe aussi p, $a^1/_2$, a^2, b^1. Clivage a^1 imparfait. Les cristaux sont généralement maclés (fig. 484) suivant la loi expliquée à la page 320. Cette macle est si usuelle, qu'elle est connue sons le nom de *macle des spinelles*.

La composition de l'espèce est assez variable, la magnésie pouvant être partiellement remplacée par l'oxyde ferreux (jusqu'à 24 %) et la chaux (jusqu'à 10 %), tandis que l'oxyde ferrique, substitué à l'alumine, peut former de 0 à 14 %. Presque toujours on trouve près de 2 % de silice.

Fig. 484.



La couleur est très variable ; elle peut être : rouge foncé (*Rubis spinelle*) ; rose (*Rubis balais*) ; jaune d'or (*Rubicelle*) ; vert, bleu ou brun (*Ceylonite, Candite*) ; vert de pré (*Chlorospinelle*) ; noir (*Pléonaste, Picotite*).

Éclat vitreux très vif. Indice : 1,712 à 1,715 (raie D).

Infusible; les variétés rouges, chauffées, changent momentanément de couleur; mais, en se refroidissant, elles reprennent leur nuance primitive. Difficilement soluble dans le borax ; plus facilement dans le sel de phosphore. Toutes les variétés résistent énergiquement à l'acide fluorhydrique.

Le nom de *Spinelle* est très ancien ; celui de *Ceylonite* rappelle que cette gemme a été trouvée à Ceylan, associée au saphir. Le *Pléonaste*, ainsi nommé par Haüy parce qu'il est surchargé de facettes, est un spinelle noir, à 17,5 %. MgO et 14. FeO. On le trouve à Ceylan, à la Somma, au Tyrol, au Puy, etc. La *Picotite* est un spinelle chromifère, à 8 %. Cr^2O^3, avec 10 %. MgO et 24 %.

FeO. Ces deux dernières variétés abondent parmi les serpentines et les péridodites, tandis que le vrai spinelle existe à l'état sporadique dans les schistes cristallins et les gneiss.

Dans les lames minces, le Pléonaste est opaque ou vert foncé ; la Picotite, opaque ou brun jaunâtre.

Les sections sont généralement carrées et leur surface, dans le baume de Canada, se montre rugueuse.

Le spinelle magnésien a servi de type pour toute une série d'aluminates où le fer, le chrome, le zinc, le magnésium, l'aluminium, se remplacent par isomorphisme et qu'on a groupés sous la dénomination de *Spinellides*. Tous sont cubiques et affectent une préférence marquée pour la forme octaédrique, avec macle des spinelles. Nous citerons les suivants :

Hercynite (Fe, Mg) Al^2O^4, où presque toute la magnésie (sauf 3 %) est remplacée par le protoxyde de fer. — P. S. = 3,91 à 3,95. — D. = 7,5 à 8. — En masses grenues, noires, seulement avec traces de formes octaédriques ; infusible ; se trouve en Bohême.

Gahnite. (Zn,Mg,Fe) $(Al,Fe)^2O^4$. — P. S. = 4,3 à 4,9. — 7,5 à 8.

Ce spinelle zincifère, contenant 55 à 60. Al^2O^3 ; 0 à 9. Fe^2O^3 ; 0 à 4. FeO ; 0 à 5. MgO ; 24 à 34. ZnO, avec 0 à 4. SiO^2, est vert foncé, vert poireau, vert noirâtre, noir. Infusible. Réact. 39. Une variété du Brésil fournit une gemme d'un vert jaunâtre. Dédiée à Gahn.

Creittonite ou *Gahnite ferrifère*, à 14 %. FeO.

Dysluite ou Gahnite ferro-manganésifère. à 42 %. Fe^2O^3 et 7,6. MnO.

L'individualité de plusieurs de ces espèces est d'ailleurs douteuse et quelques-unes peuvent n'être que des mélanges où intervient l'oxyde de fer.

Le fer chromé et le fer oxydulé ont des titres incontestables à figurer, ainsi que la Franklinite, parmi les spinellides. Cependant nous en réserverons la description pour le groupe des minerais, avec lequel ils se classent encore plus naturellement.

NITRATES

Nitre ou **Salpêtre**. — P. S. = 1,937. — D. = 2. — S. rhombique ; R. A. = 0,591 : 1 : 0,701. $mm = 118°49$; $g^1e^1 = 125°6'$; $b^1/_2 m = 135°28'$.

Combinaisons : $mg^1e^1b^1/_2$; $mg^1e^2e^1e^1/_2$; macles suivant m ; clivage e^1 parfait ; g^1 moins parfait. Incolore, blanc, gris. Éclat vitreux. A. O. dans h^1. Signe opt. négatif. Bissectrice normale à p ; $n_g = 1,5064$; $n_m = 1,5056$; $n_p = 1,3346$. 2V = 6°. Saveur salée et fraîche. Fondu sur le fil de platine, colore la flamme en violet. Soluble.

Nitratine ou **Natronitre**. $NaAzO^3$. — P. S. = 2,09 à 2,29. — D. = 1,5 à 2. — S. rhomboédrique : R. A. = 1 : 0,828 ; pp = 106°33′.

Forme observée : p, avec clivage p. Double réfraction énergique, négative ; n^o = 1,586 ; n^e = 1,36. Saveur fraîche : fuse sur le charbon. Réact. 5. Soluble, couvre de grandes étendues au Pérou.

BORATES

Borax. $H^{20}Na^2B^4O^{17}$ — P. S. = 1,7. — D. = 2 à 2,5. — S. monoclinique : R. A. = 1,1 : 1 : 0,563 ; mm = 87° ; ph^1 = 106°35′ ; pm = 101°20′ ; $pb^1/_2$ = 139°30′.

Combinaison $mh^1g^1pb^1b^1/_2e^1/_2$. Clivage parfait h^1, moins parfait m. Blanc, grisâtre ; éclat vitro-résineux. Dispersion croisée. Signe optique négatif. Bissectrice normale à g^1. 2V = 39° ; n_g = 1,473 ; n_m = 1,470 ; n_p = 1,447. $\rho > v$. Saveur alcaline. Gonfle et fond au chalumeau. Réact. 16,23. Se trouve sur les bords de certains lacs au Tibet, en Californie, en Perse, etc. C'est le *Tincal* ou *Tinkal* de l'Inde.

Un borate de chaux compact, terreux, dont l'aspect rappelle la craie, est la **Pricéite** (dédiée à Price), $Ca^3B^8O^{16}$. 6 H^{20}, contenant 49. B^2O^3 ; 31.8 CaO ; 18,2. H^2O. Cette espèce est identique avec la **Pandermite**, qui forme des masses micro-cristallines, associées au gypse en Asie Mineure. On la considère comme une variété da la **Colemanite** de Californie, minéral monoclinique de formule $H^{10}Ca^2B^6O^{16}$.

L'**Hayésine**, $H^{12}CaB^4O^{13}$, ou $H^8CaB^4O^{11}$, est encore un borate de chaux, d'un blanc de neige, trouvé au Pérou.

L'**Ulexite**, qui lui ressemble et se trouve aussi au Pérou, contient 6,5 de soude et répond à la formule $Na^2B^4O^7 + 2CaB^4O^7 + 18H^2O$. Les aiguilles d'Ulexite ont un allongement positif, tandis que, pour l'Hayésine, le signe est variable.

Boracite. $Mg^6B^{16}O^{30} + MgCl^2$. — P. S. = 2,91. — D. = 7. — S. cubique.

La Boracite offre, au moins en apparence, un remarquable exemple de la symétrie cubique avec hémiédrie tétraédrique. Combinaisons : p, $\frac{1}{2}a^1$; pb^1, $\frac{1}{2}a^1$, (fig. 485) ; pb^1, $\frac{1}{2}a^1$ (droit), $\frac{1}{2}a^1$ (gauche), $\frac{1}{2}a^2$ (fig. 486). Les faces marquées 1, et qui correspondent à l'un des deux tétraèdres, étant mates et raboteuses, celles du tétraèdre conjugué, notées 2 et entourées par les facettes de l'hémitrapézoèdre, sont unies et brillantes.

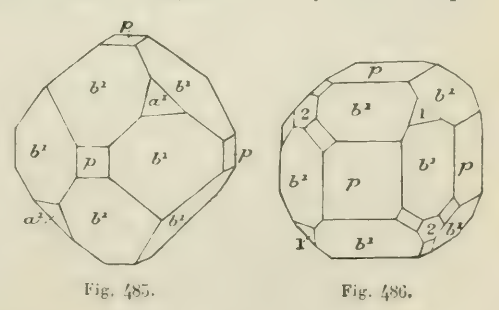


Fig. 485. Fig. 486.

Clivage imparfait suivant a^1. Cassure conchoïdale ou inégale. Incolore, blanche, grise, jaunâtre, brune; poussière blanche. Éclat vitreux. Pyroélectrique; les pôles antilogues correspondent aux faces notées 2 sur la figure 486, les pôles analogues aux faces 1. Au chalumeau, bouillonne, colore la flamme en vert et fond difficilement en une perle blanchâtre. En poudre fine, lentement soluble dans les acides chlorhydrique et azotique. Se trouve dans des gisements d'anhydrite, de gypse et de sel.

Les propriétés optiques de la boracite ont conduit Mallard à considérer ce minéral comme devant sa symétrie cubique apparente au groupement de douze individus rhombiques (1), dans lesquels, selon M. Em. Bertrand, l'angle des axes optiques est voisin de 90 degrés. Dans ce cas, les faces b^1 deviendraient h^1; p serait m, a^1 se changerait en e^1. Du reste, les cristaux de Boracite sont généralement formés de lamelles minces, parallèles à h^1 ou à e^1, et offrant l'une des six orientations que permet la symétrie-limite du système. Nous rappellerons aussi que, vers 265°, la boracite devient complètement isotrope. Cette transformation absorbe une quantité déterminée de chaleur.

Si l'on considère la Boracite comme rhombique, avec R. A. très voisin de 0,707 : 1 : 1, l'espèce est de signe optique positif, avec une bissectrice normale à g^1 (et parallèle à une grande diagonale du pseudo-dodécaèdre rhomboïdal). A. O. dans h^1; $2V = 83°6'$; $n_g = 1,673$; $n_m = 1,667$; $n_p = 1,662$.

Sous le nom de **Jéréméiewite**, M. Damour a décrit (2) un borate d'alumine $(Al,Fe)^2B^2O^6$, recueilli en Sibérie par M. Jéreméiew. Ce minéral, de P. S. = 3,28 et D. = 6,5, se présente en prismes transparents, à peu près incolores, de symétrie hexagonale en apparence. Il renferme 55. Al^2O^3 et 40. B^2O^3. En réalité sa symétrie est rhombique avec R. A. = 0,577 : 1 : 0,789; $pe^1 = 141°43'$. Signe opt. négatif. Biss. normale à p; A. O. dans h^1. Indice moyen : 1,94.

La **Rhodizite** de l'Oural a d'abord été considérée comme un borate de chaux et décrite sous le nom de *chaux boratée*. Son poids spécifique est 3,4 et sa dureté s'élève à 8. Sa forme dérive en apparence du système cubique; elle se présente en petits dodécaèdres b^1, avec faces tétraédriques, implantés sur le quartz et la tourmaline rouge. Très difficilement fusible, pyroélectrique, elle doit son nom à ce qu'elle colore la flamme du chalumeau en rouge (après avoir donné d'abord une teinte verte, puis une teinte verte en bas et rouge en haut).

Il résulte de recherches récentes (3), d'abord que la rhodizite n'est pas un borate de chaux, mais bien un borate d'alumine et de potasse, avec sodium, rubidium et cæsium, de formule $R^2Al^4B^6O^{16}$; ensuite qu'elle est biréfringente et doit sa forme dodécaédrique au groupement, autour d'un même point, de

(1) Voir plus haut, pp. 338, 347. — (2) *Bull. Soc. minér.*, VI, p. 20. — (3) Bertrand, Damour, *Bull. Soc. minér.*, V, pp. 31, 72, 98.

douze pyramides. Mallard admet un rapport d'axes voisin de 0,707 : 1 : 1, avec $ph^1 = 90°$, ce qui donne une symétrie limite cubique.

CARBONATES

Les carbonates anhydres, qui forment une des divisions les plus naturelles de la minéralogie (1), peuvent être partagés, d'après le genre de leur symétrie cristalline, en deux familles, dont chacune offre un exemple bien défini d'isomorphisme, entre des espèces qui toutes répondent à la formule RCO^3. L'une de ces familles se compose de *carbonates rhombiques*, dont les formes dérivent d'un prisme orthorhombique à angle voisin de 120° et où les bases sont la baryte, la strontiane et la chaux. L'autre est formée de *carbonates rhomboédriques*, dont l'angle est compris entre 105° et 107°30', les bases isomorphes étant CaO, MgO, FeO, MnO, CeO, ZnO. Nous allons décrire ceux de ces carbonates qui ne rentrent pas dans la catégorie des minerais métalliques.

FAMILLE DES CARBONATES RHOMBIQUES

Withérite. $BaCO^3$. — P. S. = 4,2 à 4,3. — D. = 3 à 3,5. — S. rhombique : R. A. = 0,603 : 1 : 0,730 ; mm = 117°48' ; $b^{1/2}b^{1/2}$ = 109°28' sur m ; $e^{1/2}e^{1/2}$ = 111°12' sur g^1.

Combinaisons : $mg^1b^{1/2}e^{1/2}$ (fig. 487) avec $e^{1/2}g^1$ = 145°36' ; $e^{1/2}b^{1/2}$ adj. = 132°22' (mesuré). Cristaux presque toujours maclés, de manière que les faces $e^{1/2}$ et g^1 apparaissent seules au dehors, donnant naissance à des pyramides hexagonales. Clivage g^1 assez net. Double réfraction assez énergique ; signe négatif ; $\rho > v$. Biss. normale à p. A. O. dans g^1 ; 2E = 26°30'. Cassure inégale.

Éclat vitreux, un peu résineux ; blanche, grise, jaunâtre.

Ch. Réact. 17 et 87. Fusible en émail blanc.

Se trouve en cristaux et masses bacillaires, accompagnées de barytine.

Etym. : Dédiée à Withering, qui l'a découverte.

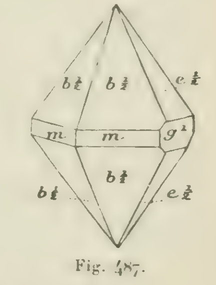


Fig. 487.

Srontianite. $SrCO^3$. — P. S. = 3,68 à 3,71. — D. = 3,5.

S. rhombique. R. A. = 0,609 : 1 : 0,724 ; mm = 117°18' ; pe^1 = 144°6'.

Cristaux presque toujours maclés, ordinairement petits ou aciculaires, en prismes mg^1, où les macles s'accusent par des angles rentrants et saillants ; groupés en masses bacillaire. Clivage m assez parfait. Double réfraction assez

(1) Des Cloizeaux, *Manuel*, II, p. 75.

énergique, de signe négatif. A. O. dans h^1. Biss. normale à p; $2E = 12^\circ,3$; $\rho < v$. Éclat vitreux; incolore ou blanche, rosée, verdâtre.

Ch. Se gonfle et brille; Réact. 2, en laissant une masse en chou-fleur; difficilement fusible. Réact. 87. Précipite par l'acide sulfurique. Du papier, trempé dans la solution azotique ou chlorhydrique, brûle avec flamme rouge.

Etym. : De Strontian en Écosse.

Aragonite. $CaCO^3$. — P. S. = 2,93 à 2,94. — D. = 3,5 à 4.

S. rhombique. R. A. = 0,622 : 1 : 0,721 ; $mm = 116^\circ 16'$; $e^1 g^1 = 125^\circ 46'$.

Combinaisons : mp ; $m\,e^1/_2$; $mp\,e^1/_2$; $mg^1\,e^1$. Macles fréquentes : 1° par hémitropie normale avec m pour plan de jonction (fig. 488), produisant des angles saillants et rentrants de $127^\circ 28'$; 2° par accolement de trois prismes, laissant entre eux un vide de $11^\circ 30'$ (fig. 489), quelquefois rempli (fig. 490) par la

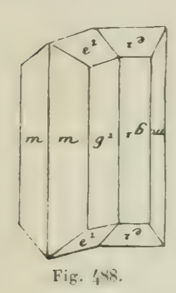


Fig. 488.

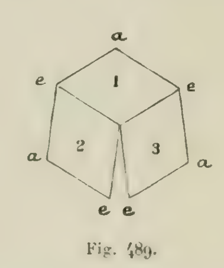


Fig. 489.

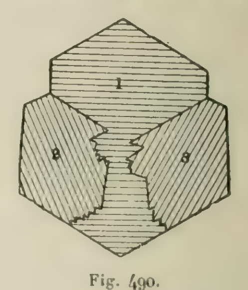


Fig. 490.

matière de l'un des trois prismes. Cette dernière macle est un groupement de symétrie-limite et représente les trois positions que peut prendre, relativement à l'axe vertical, le réseau quasi-hexagonal de l'Aragonite. Les prismes pseudo-hexagonaux qui en résultent offrent ainsi des angles saillants ou rentrants de diverses valeurs. Il y a aussi des macles suivant g^2, produisant des angles de $168^\circ 48'$, comme à Bastennes, tandis qu'à Vertaizon on observe, pour $g^1 m$, des angles de $174^\circ 24'$.

Clivage g^1 distinct.

Opt. Double réfraction énergique, de signe négatif. Biss. normale à p. A. O. dans h^1 ; $2V = 17^\circ 50'$; $\rho < v$. $n_g = 1,685$; $n_m = 1,681$; $n_p = 1,530$, La biréfringence considérable (0,155) fait naître en plaque mince des couleurs de polarisation vives et irisées, analogues à celles de la calcite.

Éclat vitreux ; incolore ; blanche, jaune, verte, fragile.

Ch. Dans le matras, gonfle et se délite ; à la flamme directe de l'alcool, *s'éparpille* en parcelles légères. Réact. 87, un peu plus lente à se produire dans les acides étendus que pour la calcite. Au spectroscope, Réact. 2 à cause de la strontiane, dont l'aragonite contient de 1 à 4 % à l'état de carbonate.

Chauffée à une température élevée, mais inférieure à celle de la décomposition, l'aragonite décrépite et se partage en un grand nombre de petits cristaux

rhomboédriques de calcite. D'autre part, M. Max Bauer a constaté que la présence d'une très petite quantité de carbonate de baryte, dans une solution saturée froide de carbonate de chaux, déterminait une précipitation d'aragonite.

L'aragonite peut être distinguée de la calcite en ce que, pulvérisée et chauffée avec une dissolution d'azotate de cobalt, elle prend une teinte rouge-lilas.

L'aragonite ne forme jamais de grandes masses; elle est souvent en agrégats bacillaires ou fibreux, coralliformes (*flos ferri*, stalactitiformes Antiparos), etc., quelquefois en grains (Carlsbad).

L'aragonite se transforme en calcaire amorphe par calcination au rouge et en marbre cristallin par fusion. Elle existe dans un grand nombre de coquilles de mollusques; les valves de *Tridacna gigas* semblent en être exclusivement composées. Le calcaire nacré (*Schaumkalk*) du Zechstein allemand est du gypse transformé en aragonite.

Etym. : De l'Aragon, où les cristaux abondent dans les marnes salifères de Molina et de Valencia.

Alstonite. Ba Ca C^2O^6. — P. S. = 3,7. — D. = 4 à 4,5. — S. Rhombique : R. A. = 0,564 : 1 : 0,714. *mm* = 121°.

Ce minéral, en cristaux maclés ou pyramidaux, encore plus compliqués que ceux de la Withérite, contient 62 à 66 % de carbonate de baryte, 30 à 34 de carbonate de chaux et 1 à 6,6 de carbonate de strontiane. Signe opt. négatif. A. O. dans h^1. Biss. normale à *p*. 2E = 9°,8.

Il décrépite au chalumeau en conservant la forme des cristaux. On le trouve à Alston Moor (Cumberland), avec withérite, calcite et croûte blanche de barytine, en compagnie de très petits cristaux de chalcopyrite.

La même formule $BaCaC^2O^6$ est celle de la **Barytocalcite** du Cumberland, qui cristallise en prismes monocliniques de 106°54' (R. A. = 0,772 : 1 : 0,625) avec $p\,h^1$ = 106°8' et $p\,o^1$ = 147°34'. (P. S. = 3,66. — D. = 4). Cette substance, qui décrépite violemment au chalumeau, avec Réact. 17 et 87, est blanche, à éclat vitreux et fragile, optiquement négative, avec $\rho > v$.

Enfin, il existe à Longban une barytocalcite rhomboédrique, où l'angle *pp* est à peu près de 105°, comme dans la calcite. Le carbonate double de baryte et de chaux offre donc un cas bien défini de trimorphisme.

FAMILLE DES CARBONATES RHOMBOÉDRIQUES

Calcite. Ca CO^3. — P. S. = 2,70 à 2,73. — D. = 3. — S. rhomboédrique : R. A. = 1 : 0,8543; *pp* = 105°5'.

La calcite est, de toutes les espèces minérales, celle qui, par la netteté de

ses caractères, a le plus influé sur le développement de la science minéralogique.

On compte plus de 170 formes simples observées ; le nombre des combinaisons est pour ainsi dire illimité.

Le rhomboèdre *primitif* p est très rare, même en combinaison. Il ne se produit guère que par l'évaporation des dissolutions de carbonate calcique très pur dans l'eau chargée d'acide carbonique. En revanche, le clivage p étant facile et net, on obtient aisément des rhomboèdres de clivage p (fig. 491), où l'angle plan du sommet est de 101°55′. On connaît plus de 8 rhomboèdres sur les angles a, de 37 sur les angles e. Parmi ces derniers, nous noterons : le

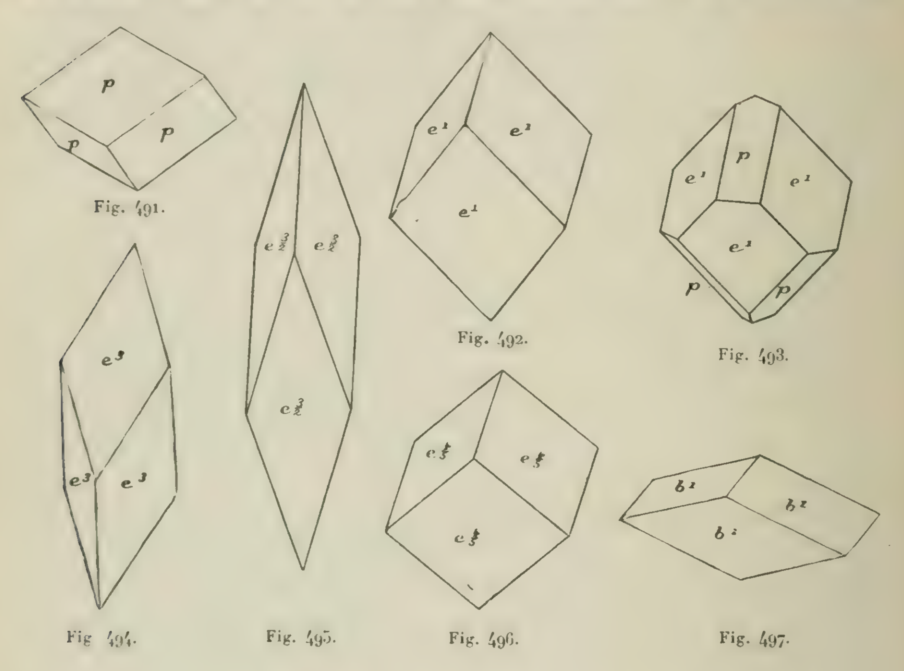


Fig. 491. Fig. 492. Fig. 493. Fig. 494. Fig. 495. Fig. 496. Fig. 497.

rhomboèdre *inverse* e^1 (fig. 492), où l'angle au sommet est de 78°51′, et dont les arêtes peuvent être tronquées par le clivage p (fig. 493) avec $p\,e^1$ adj. $=$ 129°25′30″ ; ce rhomboèdre e^1 est la forme des cristaux de calcite, avec remplissage de grès, de Fontainebleau ; le rhomboèdre e^3 (fig. 494) ou *contrastant* d'Haüy, avec angle de 65°50′ ; $e^3/_2$ (fig. 495) encore plus aigu, car l'angle est de 63°51′ ; $e^4/_5$ (fig. 496) ou rhomboèdre *cuboïde* d'Haüy, ainsi nommé à cause de son angle de 88°18′ et bien qu'il y en ait un autre, $e^3/_4$, encore plus voisin du cube, l'angle étant de 90°55.

Le rhomboèdre b^1 (fig. 497) ou *équiaxe* est très aplati ; son angle dièdre au sommet est de 134°57′ et l'on a $p\,b^1 =$ 142°32′30″.

On connait le prisme e^2, avec $p\,e^2 =$ 134°37′, souvent combiné avec b^1 et formant la variété *dodécaèdre* d'Haüy (fig. 498) ; l'angle e^2b^1 adj. est de 116°15′. Quand cette forme se raccourcit au point que e^2 disparaît presque, on a la

calcite *en tête de clou*. Il ne faut pas confondre la combinaison e^2b^1 avec une autre qui lui ressemble et qui résulte de l'union de b^1 avec le rhomboèdre aigu $e_{1/4}$, de 60°36′ (fig. 499).

Le prisme d^1 se montre aussi, et sa combinaison avec e^1 donne la figure 500 où d^1e^1 adj. $= 140°34'30$.

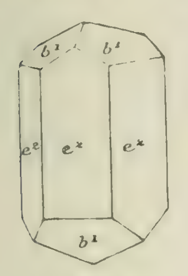


Fig. 498.

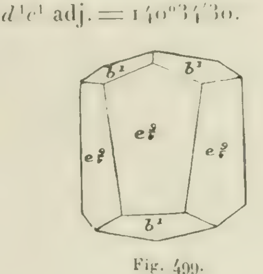


Fig. 499.

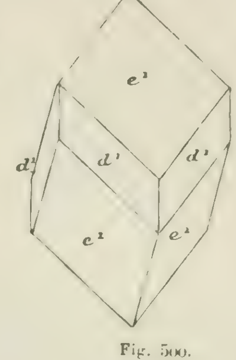
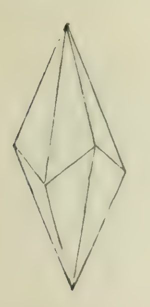
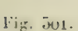


Fig. 500.

Les scalénoèdres (fig. 501) sont fréquents et surtout les *métastatiques* (1). Parmi ces derniers, d^2, souvent allongé (fig. 502), parfois tronqué (fig. 503) par le clivage p ($p\,d^2 = 150°58'$), avec $d^2\,d^2$ adj. $= 144°24'$ (arête longue), $104°38'$ (arête courte) et $d^2\,d^2$ sur $d^1 = 132°59'$; et d^6, de $94°1'$ (sur d^1) dominent au Derbyshire.

L'isocéloèdre $d^1d^{1/9}b^{1/7}$ (8.8.$\overline{16}$.3) a été rencontré en Belgique, à Rhisnes. Il porte des stries parallèles à b^1.



Fig. 501.

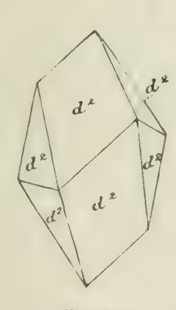


Fig. 502.

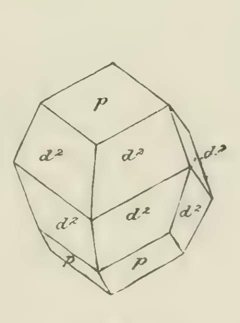


Fig. 503.

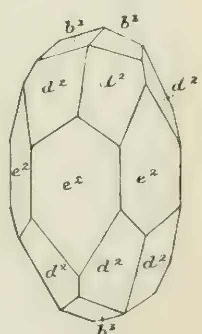


Fig. 504.

On connaît la combinaison $e^2b^1d^2$ (fig. 504) ou calcite *analogique* d'Haüy. Des Cloizeaux a signalé, dans les cristaux isolés au milieu de l'argile d'où s'extrait le *spath d'Islande* de Rödefjord, la combinaison $p\ b^4\ d^2$ (fig. 505), avec $b^4\ b^4 = 164°0'$; $p\ b^4 = 167°14'$; $p\ d^2 = 150°58'$.

L'aspect de ces derniers cristaux rappelle celui d'un cube pyramidé.

La face a^1 est fréquente ($p\,a^1 = 135°23'16''$), généralement rugueuse et opaque. A Andreasberg, elle est associée à e^2. Les faces b^1, b^2, d^1, sont ordinairement striées parallèlement à leur intersection avec p.

(1) Voir plus haut, p. 174.

Parmi les zones intéressantes, nous citerons les suivantes : $a^1b^3d^2$; $a^1b^2e_3d^1$; $d^1e^1e^2p$; $a^1b^1e^1{}_{/2}e^1e^3{}_{/2}e^2$; $e^2d^2e^1{}_{/2}p\ e^2$.

Macles fréquentes : 1° par hémitropie normale avec b^1 pour face d'assemblage

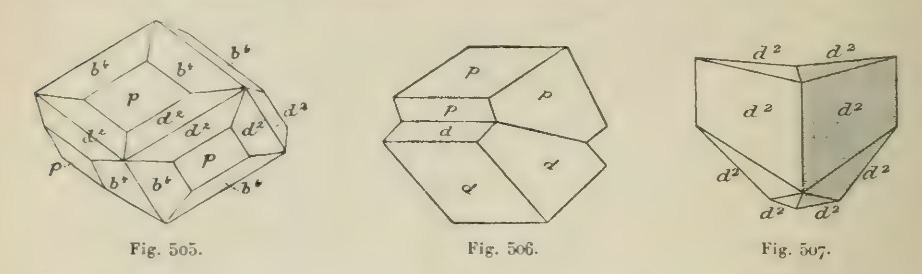


Fig. 505. Fig. 506. Fig. 507.

(fig. 506). Cette hémitropie, appliquée à d^2, donne la macle en papillon (fig. 507). Les axes principaux sont alors à 127°29′32″ l'un de l'autre. Les rhomboèdres les plus transparents du spath d'Islande sont souvent pénétrés de minces lamelles orientées suivant cette loi, qui préside aussi, comme nous le savons, au décollement par glissement de la calcite (1).

2° Par hémitropie normale avec a^1 pour face de jonction. Sur les scalénoèdres, cette hémitropie, qui se réduit à une rotation de 60° autour de l'axe ternaire (la rotation de 120° ne faisant que substituer les sommets), produit une sorte d'isocéloèdre (fig. 508) avec angles rentrants à quatre facettes. Avec la combinaison b^1e^2, au lieu de la figure 498, où

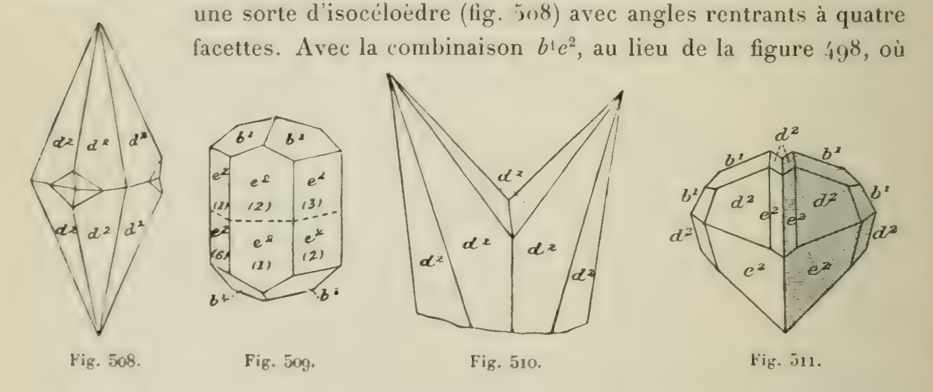


Fig. 508. Fig. 509. Fig. 510. Fig. 511.

les faces e^2 sont terminées de manières différentes aux deux extrémités d'une même verticale, on a la figure 509.

3° Plan d'assemblage parallèle et axe d'hémitropie normal à e^1 (fig. 510). Les scalénoèdres de Traverselle, maclés suivant cette loi, ont leurs axes principaux se coupant suivant des angles de 52 à 53°.

4° Plan d'assemblage p et axe normal à p. Les axes principaux font des angles de 90°46′ et de 89°14′. Cette macle est dite *en cœur* (fig. 511) parce qu'elle produit, avec les scalénoèdres d^2 du Derbyshire, une figure d'apparence cordiforme. Dans cette macle, les deux cristaux ont un clivage en commun.

(1) Voir plus haut, p. 305.

En dehors des clivages, la cassure de la calcite, difficile à obtenir, est conchoïdale. Double réfraction énergique, négative ; $n_g = 1,658$ (D) ; $n_p = 1,486$. Éclat vitreux : le rhomboèdre $e^{4/5}$ est généralement terne et arrondi. Couleur variable.

La calcite possède, comme nous l'avons déjà dit (1), une direction dépourvue de dilatation linéaire ; cette direction est la normale à un plan qui, partant du sommet, ferait, à l'intérieur, avec les faces p, un angle de 20°22'31". — Électrique par pression.

Ch. Infusible ; devient blanche et opaque, sans changer de forme ; devenue caustique, jette un vif éclat. Facile effervescence avec les acides.

Dans les plaques minces, la calcite est essentiellement caractérisée par ses vives couleurs de polarisation ; elle est comme irisée par des teintes grises, roses et bleues, qui rappellent les feux des perles fines ; sur les plaques peu inclinées relativement à a^1, les trois clivages dessinent des lignes plus fines, souvent très régulières, s'entrecroisant sous des angles de 120° (fig. 512). De plus, dans les roches, les grains et les lames de calcite offrent très fréquemment une division en minces lamelles hémitropes suivant b^1, qui s'entrecroisent en deux systèmes d'une grande régularité.

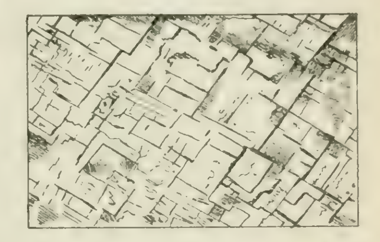


Fig. 512. — Calcite. Grossissement : 30 diam. D'après M. Rosenbusch.

La calcite est répandue dans la nature en grande abondance. La variété la plus pure est le *Spath d'Islande*, connu pour l'énergie de sa double réfraction, discernable à l'œil nu. Ce spath, qui renferme 43,70.CO^2;56,15.CaO et 0,15 d'oxydes ferreux et manganeux, remplit une grande cavité dans un trapp amygdaloïde. Le rhomboèdre basé pa^1 se présente quelquefois au Hartz en lames très minces. A Andreasberg, le prisme basé e^2a^1 offre un éclat vitreux sur e^2, nacré sur a^1. La *Prunnérite* est une calcite impure, contenue dans les trapps des îles Feroë, et où le rhomboèdre cuboïde $e^{4/5}$ est d'un violet grisâtre, à faces arrondies.

Les *stalactites* et les *stalagmites* sont de la calcite concrétionnée, clivable intérieurement en rhomboèdres. Quand leurs couches sont de nuances différentes, elles forment l'*albâtre calcaire* (*albâtre oriental* d'Égypte ; *onyx* d'Algérie). Les concrétions calcaires sont parfois en grains (*pisolites, dragées de Tivoli*). Le *spath satiné*, à éclat soyeux et nacré, est une calcite à fibres excessivement fines.

C'est encore la calcite, plus ou moins pure, qui forme les divers *marbres*, statuaires (Paros, Carrare), ou compacts.

L'*Hématoconite* est un calcaire-marbre rouge sang, mélangé d'oxyde ferrique.

(1) Voir plus haut, p. 313, 314.

A la variété grenue appartient le *marbre rouge antique*. Quant aux variétés plus ou moins amorphes de calcite qui forment les divers calcaires connus, leur étude appartient à la lithologie plutôt qu'à la minéralogie.

Il y a des cas fréquents de pseudomorphoses, où la calcite, conservant ses formes, a été transformée en quartz, en calamine, en barytine, en pyrite, etc.

La calcite se distingue de l'aragonite par sa densité moindre, son effervescence plus facile aux acides et la manière différente dont elle se comporte au chalumeau. Le dimorphisme du carbonate de chaux s'explique d'ailleurs sans peine, si l'on réfléchit que la symétrie de l'aragonite est pseudo-hexagonale.

Dolomie. — La Dolomie (dédiée à Dolomieu) répond généralement à la formule $CaMgC_2O^6$, c'est-à-dire à $CaCO^3 + MgCO^3$, qui correspond à 54,21 % du premier carbonate contre 45,79 du second. Plus rarement, sa composition peut être exprimée par $Ca^3C^3O^9 + Mg^2C^2O^6$ (63,97 contre 36,03) ou par $Ca^2C^2O^6 + MgCO^3$ (70,30 : 29,70).

P. S. = 2,85 à 2,92. — D. = 3,5 à 4. Syst. rhomboédrique : R. A. = 1 : 0,832 ; $pp = 106°15'$, avec angle plan du sommet égal a 102°37'46".

Autant le rhomboèdre primitif est rare pour la calcite, autant le rhomboèdre p de la dolomie est fréquent, soit seul, soit en combinaison avec a^1 (fig. 513), l'angle a^1p étant de 136°8'.

Les principales combinaisons sont : p ; $p\,a^1$; $p\,e^3$ (fig. 514, avec $e^3e^3 = 66°7'$ et $pe^3 = 148°27'$; $p\,b^1$; a^1e^3 ; a^1pe^3 ; $d^1\,pe^3$; $d^1pe^3e^1$; etc. Le prisme e^2 est fort rare.

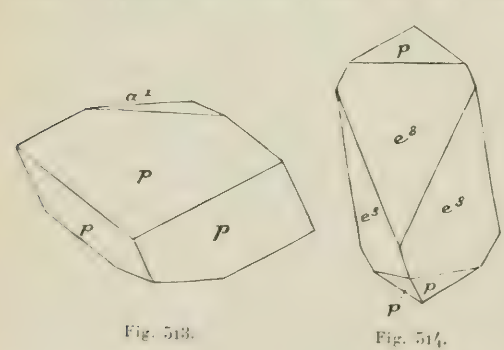


Fig. 513. Fig. 514.

Quelques formes indiquent une hémiédrie, au moins apparente et accusée par la combinaison de e^3 et de p avec six faces seulement du scalénoèdre $d^1d^1/_5d^1/_2$. Du reste, les figures de corrosion de la Dolomie ne sont jamais symétriques et conduisent à l'hypothèse d'un polyèdre particulaire holoaxe hémisymétrique dont l'influence est habituellement masquée par la coexistence des formes conjuguées.

Clivage p parfait. Hémitropies normales avec a^1 et p pour faces de jonction. Double réfraction énergique, négative ; $n_g = 1,682$; $n_p = 1,503$. Éclat vitreux ; couleur variable.

Ch. Infusible. A la température ordinaire, la poudre fait effervescence avec l'acide chlorhydrique ; mais les fragments non pulvérisés se dissolvent lentement et sans effervescence appréciable, quoique complètement.

La dolomie peut être compacte, saccharoïde ou marmoréenne et grenue ; elle est quelquefois bitumineuse, fétide et cendreuse.

La dolomie grenue se distingue en général par un toucher beaucoup plus rude que celui des marbres calcaires. En plaque mince, elle donne des couleurs irisées à fond gris.

Presque toutes les dolomies contiennent un peu de fer et de manganèse, remplaçant la chaux ou la magnésie par voie d'isomorphisme. On donne le nom de *spaths brunissants* aux dolomies qui contiennent plus de 15 °/₀ de carbonate ferreux, parce qu'elles brunissent par exposition à l'air. C'est aussi à ces variétés que s'applique la dénomination d'*Ankérite*.

Il existe à Teruel (Espagne) une dolomie à 2,63 °/₀ d'oxyde de fer, qui se présente dans le gypse en petits cristaux noirs pa^1 ; on lui a donné le nom de *Teruelite* ; mais ce n'est pas une espèce distincte. La face a^1 est rugueuse et terne, les autres étant brillantes.

Giobertite. $MgCO^3$. — P. S. = 2,99 à 3,15. — D. = 4,5 à 5. — S. rhomboédrique : R. A. = 1 : 0,809 ; pp = 107°30′.

Les seuls cristaux connus ont la forme p. Clivage p parfait. Double réfraction énergique, négative ; n_o = 1,72 ; n_e = 1,51. Éclat vitreux ; incolore, jaune ou brune.

Ch. Réact. 81. Se dissout dans l'acide chlorhydrique ; mais l'effervescence ne se produit qu'à chaud.

En cristaux dans la serpentine, le schiste chloriteux, le mélaphyre. En masses compactes dans les schistes cristallins.

Étym. : Nom donné par Beudant en l'honneur de Giobert. Beaucoup d'auteurs emploient le nom de *Magnésite*, qui a l'inconvénient de désigner déjà l'Écume de mer.

L'isomorphisme de la magnésie et de l'oxyde ferreux ne donne pas seulement naissance aux variétés, plus ou moins bien définies, qu'on appelle les spaths brunissants. Quelques combinaisons se montrent plus particulièrement stables et constituent presque des espèces. Nous en citerons deux :

Pistomésite. $MgCO^3 + FeCO^3$. — P. S. = 3,42 à 3,43. — D = 4. — S. rhomboédrique : pp = 107°78′.

Masses spathiques à grandes lames, clivables suivant p, d'un gris jaunâtre. Noircit et devient magnétique au chalumeau. Soluble sans effervescence à froid. Contient 44. CO^2 ; 22. MgO ; 34. FeO.

Mésitine. $Mg^2C^2O^6 + FeCO^3$. — P. S. = 3,35 à 3,38. — D. = 3,5 à 4. — S. rhomboédrique : pp = 107°14′.

Clivage p parfait. Cristaux jaunâtres ou bruns. Mêmes réactions que l'espèce

précédente. Le Mésitine contient 46. CO^2 ; 28. MgO et 24 à 27. FeO. Il accompagne la dolomie et la pyrite à Traverselle.

Étym. : μεσίτης, intermédiaire (entre giobertite et sidérose). Le nom de *pistomésite* rappelle que c'est plutôt cette espèce qui devrait former la transition.

La **Breunérite**, à 50 %. CO^2 ; 31 à 42. MgO ; 3 à 16. FeO, avec P. S. = 3,1. — D. = 4 à 4,5, est encore une espèce intermédiaire, ou plutôt une variété, grise, jaune ou brune, produite par l'isomorphisme de Fe et Mg.

Les carbonates de fer, de manganèse et de zinc pourraient ici trouver place, de même que le carbonate de plomb eût été convenablement décrit à la suite de la série rhombique. Mais les uns et les autres sont réservés pour le groupe des minerais.

FAMILLE DES CARBONATES HYDRATÉS

Thermonatrite. $H^2Na^2CO^4$ — P. S. = 1,5 à 1,6. — D. = 1,5. — S. rhombique : R. A. = 0,827 : 1 : 0,809 ; *mm* = 109°50′.

Infusible : facilement soluble dans l'eau. Saveur piquante, alcaline.

Natron. $H^{20}Na^2CO^{13}$. — P. S. = 1,42 à 1,5. — D. = 1 à 1,5.

S. monoclinique ; R. A. = 1,419 : 1 : 1,483 ; *mm* = 79°41′ ; ph^1 = 57°40′ (1).

En cristaux $mg^1b^1/_2$, avec $b^1/_2b^1/_2$ adj. = 76°28′. Clivage h^1. Signe opt. négatif. A. O. dans un plan normal à g^1. Biss. normale à g^1. $\rho > \nu$.

Efflorescent, fusible, soluble, saveur piquante ; donne avec les acides une vive effervescence. En dissolution dans les lacs *Natron* en Égypte, et dans la plupart des eaux thermales alcalines.

Urao. $H^{10}Na^6C^4O^{20}$. — P. S. = 2,11. — D. = 2,5.

S. monoclinique. R. A. = 2,28 : 1 : 1,804 ; *mm* = 47°30′ ; ph^1 = 86°24′ (2).

En cristaux ma^1o^1, avec a^1o^1 = 103°15′. Clivage o^1 parfait. Signe opt. négatif. Biss. normale à g^1. 2V = 76°,5. Ind. = 1,5. Très soluble, saveur alcaline ; s'effleurit à peine ; fond facilement au chalumeau.

En masses bacillaires ou compactes ; c'est le *Trona* d'Afrique, l'*Urao* du Venezuela.

(1) Dana, d'après Haidinger, admet R. A. = 1,48 : 1 : 1,40 ; ce qui transforme notre $b^1/_2b^1/_2$ en *mm*. — (2) Ces notations sont celles de Mallard ; d'autres auteurs, gardant *m*, prennent o^1 pour *p* ; d'autres admettent : R. A. = 2,81 : 1 : 2,99 avec ph^1 = 103°15′ ; alors *m* devient $b^1/_2$.

Gay-Lussite. $H^{10}Na^2CaC^2O^{11}$. — P. S. = 1,93 à 1,95. — D. = 2,5.

S. monoclinique. R. A. = 1,492 : 1 : 1,447 ; *mm* = 68°42′ ; ph^1 = 101°14′ ; e^1e^1 sur *p* = 70°20′.

Cristaux allongés suivant $b^1{}_{/2}$. Clivage *m* facile. Incolores, transparents.

Double réfraction très énergique, de signe négatif. Biss. normale à g^1. $\rho < v$; 2E = 51°,6 (rouge).

Décrépite dans le matras, fond facilement au chalumeau. En partie soluble dans l'eau. Vive effervescence avec les acides. Se trouve au Venezuela et dans le Nevada. Dédiée à Gay-Lussac.

Hydromagnésite. $H^8Mg^4C^3O^{14}$. — P. S. = 2,64 à 2,68. — D. = 1,5 à 2.

S. monoclinique, *mm* = 87°56′ ; ph^1 = 82° à 83°. Petits cristaux aciculaires ou feuilletés, aplatis suivant h^1. Au chalumeau, blanchit sans fondre ; ne donne d'effervescence qu'à chaud.

L'**Hydrodolomite** est une substance amorphe, trouvée à la Somma, qui renferme 43. CO^2 ; 27. CaO ; 23. MgO et 7. H^2O. Sa densité est 2,49.

SULFATES

FAMILLE DES SULFATES ANHYDRES

Glasérite. K^2SO^4. — P. S. = 2,5 à 3. — D. = 3 à 3,5. — S. rhombique : R. A. = 0,573 : 1 : 0,746 ; *mm* = 120°24′.

Combinaison $mg^1b^1b^1/_2e^1e^1/_2p$; avec $e^1/_2e^1/_2$ = 112°22′ sur *p*. Clivage *p* imparfait.

Blanche, saveur salée ; soluble. Inaltérable à l'air ; fusible avec intumescence ; Réact. 102. Se trouve au Vésuve. Dédiée à Glaser.

Unie au sulfate de chaux dans la proportion de 3. K^2SO^4 pour 1. Na^2SO^4, la Glasérite donne naissance à une substance rhomboédrique (*pp* = 88°14′), nommée *Aphthalose* (*Aphtalose*) ou *Aphthitalite*. M. Dana ne sépare pas les deux variétés, et admet avec M. Strüver que la Glasérite est vraiment rhomboédrique et identique avec l'Aphthitalite.

Taylorite $(K.Am)^2SO^4$ ou 5 K^2SO^4. $(Am)^2SO^4$.

Ce sulfate, qui contient 43,5 de potasse avec 5,4 d'oxyde d'ammonium, forme des masses cristallines ou concrétionnées dans le guano des îles Chincha. Dédiée à W. J. Taylor.

Thénardite. Na^2SO^4. — P. S. — 2,67 à 2,73. — D. = 2,5. — S. rhombique : R. A. = 0,473 : 1 : 0,800 ; *mm* = 129°11′ ; $b^1/_2 b^1/_2$ adj. = 74°18′ et 135°41′ sur les arêtes culminantes.

Forme $m p b^1/_2$; clivage *p* parfait. Incolore ou blanche, éclat vitreux, efflorescente. Signe opt. positif. Biss. normale à g^1 ; A. O. dans *p*. 2V = 83° ; n_m = 1,470, Réact. 5. Soluble.

Se présente en croûtes cristallines dans les salines d'Espagne et en Bolivie. Dédiée à Thénard.

Glaubérite. $Na^2CaS^2O^8$. — P. S. = 2,64 à 2,85. — D. = 2,5 à 3.

S. monoclinique ; R. A. = 1,2199 : 1 : 1,9275 ; *mm* = 83°2′ ; ph^1 = 112°11′ ; $d^1/_2 d^1/_2$ = 116°20′.

Forme $pd^1/_2$, souvent avec *m* ; angle $pd^1/_2$ = 136°58′.

Incolore, blanc grisâtre, blanc jaunâtre, rouge brique. Éclat vitreux. Signe opt. négatif ; 2E = 9°,5 (bleu). Biss. normale à g^1.

Saveur salée et astringente. Décrépite et fond au chalumeau. Réact. 44. Partiellement soluble. Trouvée dans les salines. Dédiée à Glauber.

Barytine. $BaSO^4$. — P. S. = 4,48 à 4,72. — D. = 3 à 3,5. — S. rhombique : R. A. = 0,815 : 1 : 1,314 ; *mm* = 101°40′ ; *pa* = 121°50′ ; pe^1 = 127°18′.

Combinaisons : pa^2m (fig. 515), avec pa^2 = 141°8′ ; a^2a^2 adj. = 77°43′ ; pma^2, avec a^2 subordonné (fig. 516) ; pa^2e^1 (fig. 517), avec e^1e^1 = 105°24′ sur g^1 : e^1e^1 = 74°36′ sur *p* :

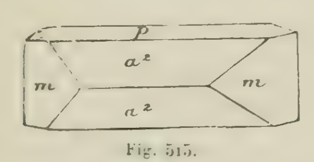


Fig. 515.

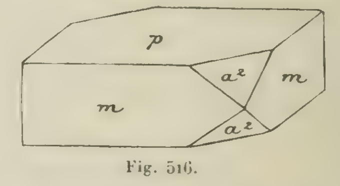


Fig. 516.

$m p a^2 e^1 b^1/_2$ (fig. 518), avec $p b^1/_2$ = 115°42′ ; $m p a^2 h^1 e^1 b^1/_2$ (fig. 519), avec mh^1 = 129°10′ ; $pa^2e^1h^1g^1$; ph^1g^1 ; $m e^1$; $m p a^2 a^5 e^1 g^1$, avec a^5a^5 = 144°16′

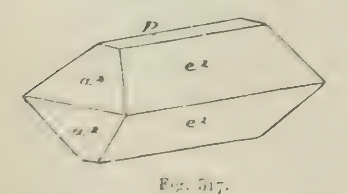


Fig. 517.

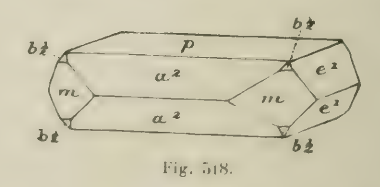


Fig. 518.

sur *p* ; $pa^1a^2e^1$, très aplati (fig. 520), donnant aux cristaux une forme tabulaire, avec a^1a^1 = 63°39′ sur *p*, etc.

Quelques auteurs, notamment M. Tschermak, adoptent pour forme primitive le prisme de 116°21′, formé par les faces a^1 ; alors p devient g^1 et m se change en a^1.

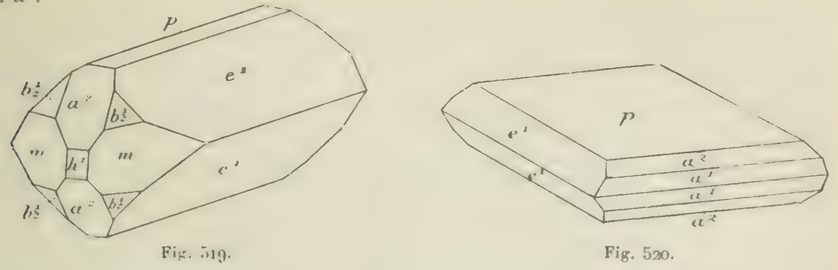


Fig. 519. Fig. 520.

Clivages p et m parfaits ; g^1 moins parfait. Macles par hémitropie normale à h^1. Cette macle réunit d'ordinaire un grand nombre de cristaux, de manière à reproduire la forme d'une crête de coq (*Barytine crêtée*).

Couleur blanche, passant au jaune, au brun, au rouge ou au bleu. Éclat vitreux, accidentellement nacré. Signe optique positif. A ; O. dans g^1 ; Biss. normale à h^1 ; $\rho < v$. $2V = 35°$; $n_g = 1{,}647$; $n_m = 1{,}637$; n_p 1,636.

Ch. Décrépite et fond difficilement, avec Réact. 17. Sur le charbon, Réact. 44. Fondue au feu de réduction, humectée d'acide chlorhydrique et exposée au bord bleu de la flamme, ne donne aucune coloration (ce qui la distingue de la célestine). Insoluble dans l'eau, les acides et les alcalis.

Abonde dans les filons et amas métallifères, où elle est souvent en lames ou en tables nacrées d'un blanc de lait. Les plus gros cristaux, de couleur blonde, se trouvent en Auvergne.

Il existe une barytine bacillaire (*Stangenspath*), une variété globuleuse radiée (*Pierre de Bologne*) et une variété concrétionnée (*Pierre de tripes*).

Étym. : βαρύς, pesant. De là le nom de *Schwerspath* ou *spath pesant* des Allemands.

Célestine. $SrSO^4$. — P. S. = 3,92 à 3,97. — D. = 3 à 3,5. — S. rhombique : R. A. = 0,779 : 1 : 1,280 ; mm = 104°10′ ; (103°58′ d'après Friedel) ; e^1p = 127°56′.

Combinaisons : mpe^1 (fig. 521) avec e^1e^1 = 104°8′ sur p et me^1 = 118°52′ ;

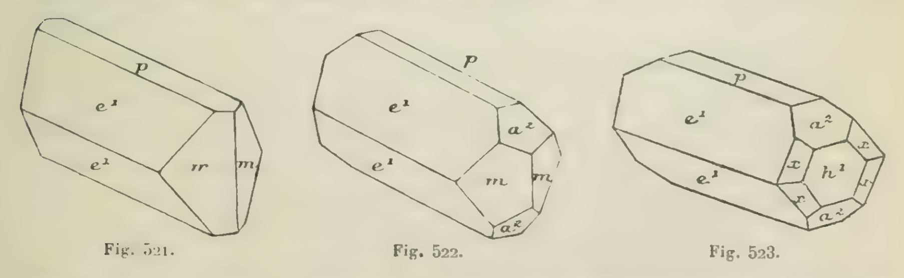


Fig. 521. Fig. 522. Fig. 523.

mpa^2e^1 (fig. 522), avec pa^2 = 140°35′ ; $pa^2h^1e^1x$ (fig. 523) avec $x = \{b^1/_2 b^1/_4 g^1/_3\}$;

e^1x, etc. Les formes sont à peu près les mêmes que pour la barytine ; mais c'est en général l'allongement suivant la petite diagonale, c'est-à-dire parallèlement à pe^1, qui prévaut.

Clivages : p parfait ; m distinct, g^1 moins facile. Mêmes propriétés opt. que la Barytine. A. O. dans g^1. $n_m = 1{,}623$. Biréfringence : 0,0088. Polychroïque. Couleur blanche, passant souvent au bleuâtre (d'où le nom de célestine) ou au rougeâtre. Éclat vitreux ou nacré.

Ch. Décrépite vivement, fond difficilement. Réact. 44. Un petit fragment, humecté d'acide chlorhydrique, donne la Réact. 2. Insoluble.

En cristaux prismatiques nacrés, avec soufre natif, en Sicile ; en masses laminaires dans le Tyrol et le Devonshire ; en nodules compacts avec petits cristaux aciculaires à Montmartre ; en masses fibreuses bleues dans le terrain crétacé inférieur de l'Est de la France, etc. Parfois pseudomorphique de gypse ou de calcaire.

Anhydrite ou **Karsténite**. $CaSO^4$. — P. S. = 2,89 à 2,98. — D. = 3 à 3,5. — S. rhombique : R. A· = 0,893 : 1 : 1,001 ; $mm = 96°36'$; $e^1e^1 = 90°4'$ sur p. — (Les évaluations des auteurs, pour mm, varient de 91°10' à 103° et M. Zirkel prend pour m ce que, d'après Mallard, nous avons noté e^1).

L'Anhydrite est caractérisée par ses trois clivages à angle droit suivant p, h^1 et g^1. Ce dernier est le plus net et le plus facile. Il a l'éclat nacré et est marqué de stries fines parallèles à pg^1. Le second, presque aussi facile, est le clivage p, vitreux, également strié suivant pg^1. Le clivage h^1 est plus terne, un peu moins net et dépourvu de stries. Ces trois clivages, qui donnent à l'anhydrite une apparence de symétrie cubique, expliquent le nom de *Würfelspath* qu'elle avait reçu de Werner, mais que ce dernier a changé plus tard en celui d'anhydrite, pour marquer l'absence d'eau de constitution.

Combinaisons : me^1 ; $me^1e^{2/3}$; mpe^1 ; a^1e^1 ; mph^1g^1 ; $ph^1g^1b^{1/2}$ avec les facettes $\{b^1b^{1/3}h^1\}$ et $\{b^{1/2}b^{1/4}h^1\}$; $a^1a^2a^3a^5e^1$ Stassfurt).

Couleur blanche, passant au grisâtre, au bleuâtre ou au rougeâtre. A. O. dans g^1. Biss. positive, normale à h^1. $2V = 42°8$; $n_m = 1{,}576$; biréfringence : 0,043. Très diamagnétique.

Ch. Ne blanchit pas et ne s'exfolie pas (ce qui la distingue du gypse) ; fond difficilement. Réact. 44. Tranquillement soluble dans l'acide chlorhydrique. Réact. 103.

Cristaux habituellement tabulaires ; aussi masses fibreuses et masses compactes un peu granulaires, rappelant l'aspect du marbre blanc. Ordinairement associée au sel gemme et au gypse, dans lequel elle se transforme en absorbant l'humidité atmosphérique.

Alumiane. Al^2SO^6. Petits cristaux rhomboédriques (P.S. = 2,7. — D. = 2 à 3) et masses amorphes, ne donnant au chalumeau que la Réact. 89.

FAMILLE DES SULFATES HYDRATÉS

Mirabilite. $H^{20}Na^2SO^{14}$. — P. S. = 1,48. — D. = 1,5 à 2. — S. monoclinique : R. A. = 1,116 : 1 : 1,237. $mm = 86°31'$; $ph^1 = 107°45'$; $b^1b^1 = 93°12'$.

La Mirabilite, ou *sel admirable de Glauber*, forme, dans les gîtes salifères, des cristaux ou des masses cristallines, à clivage h^1 parfait, blanches, d'éclat vitreux, solubles dans l'eau, efflorescentes, à saveur fraîche et amère. Signe opt. négatif. Biss. normale à g^1 ; 2E = 122°,8 ; $\rho > v$; $n_m = 1,44$. Elle renferme 56 % d'eau et fond aisément au chalumeau, avec réact. 5 et 44.

Gypse. H^4CaSO^6 — P. S. = 2,31 à 2,33. — D. = 1,5 sur g^1 et 2 sur p.

S. monoclinique. R. A. = 0,744 : 1 : 0,412 (1) ; $mm = 111°30'$.

Combinaisons : mg^1a_3 (fig. 524), avec $a_3a_3 = 143°48'$ (ou 143°42') ; $mg^3g^1a_3p$ (fig. 525), avec $g^3g^1 = 143°42'$ et $a_3 = b^1b^1/_3h^1$; pa_3 adj. = 117°3' ; faces a_3 souvent courbes (2.)

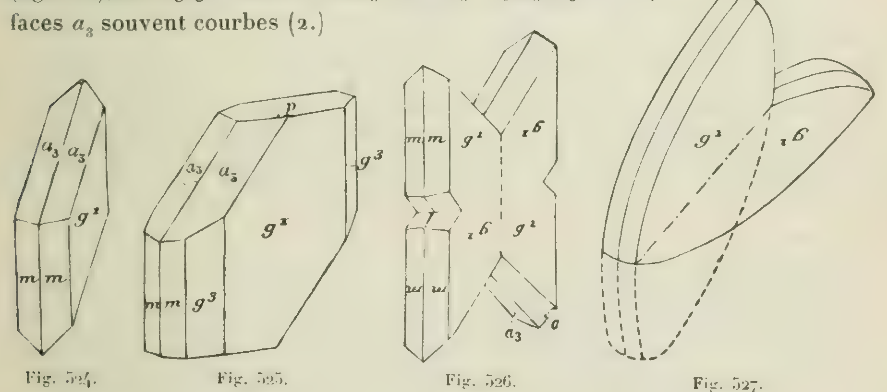


Fig. 524. Fig. 525. Fig. 526. Fig. 527.

Angles : $e^1e^1 = 138°40'$; $e^1m = 120°45'$; pm ant. = 109°31'.

Macles fréquentes : 1° par hémitropie normale à h^1, souvent répétée, de manière à produire le double cristal de la figure 526 ; 2° par hémitropie autour d'un axe normal à $a^1/_2$ ($pa^1/_2 = 118°35'$) ; c'est la macle dite en *fer de lance* (fig. 527), qu'on peut expliquer si l'on admet qu'un cristal, terminé de part et d'autre du plan médian parallèle à g^1 par des faces très courbes, correspondant

(1) Des Cloizeaux a montré (*Bull. Soc. minér.*, IX, 1886, p. 178) qu'on peut tout aussi bien admettre $mm = 111°22'$, avec R. A. = 0,746 : 1 : 0,412 ou R. A. = 0,747 : 1 : 0,413. Enfin, sur de très beaux cristaux de Russie, M. Cesarò a déterminé $mm = 111°25'$, avec R. A. = 0,747 : 1 : 0,412. — (2) Ce sont celles que plusieurs auteurs, d'après Miller, notent $d^1/_2$, en transformant p en a^1.

à p, a_3, e_1, soit devenu hémitrope par rotation autour d'un axe normal à $a^1/_2$. L'angle rentrant est de 123°48′. L'angle aigu opposé est tantôt de 25°26′, tantôt de 57°11′. Les cristaux ainsi maclés affectent une forme lenticulaire.

Clivage très parfait suivant g^1, à faces continues, miroitantes et offrant souvent le phénomène des anneaux colorés ; clivage vitreux suivant h^1 ; clivage fibreux suivant p (1) ; ces deux derniers clivages marquent, sur g^1, des stries qui s'entre-croisent sous des angles de 113° et de 66°.

Le gypse se raye très facilement à l'ongle et forme souvent des lamelles minces flexibles.

Incolore, blanc jaunâtre, jaune de miel, rouge, gris. Poussière blanche. Éclat vitreux, nacré sur g^1, soyeux sur p.

Opt. Signe positif. $n_g = 1,529$; $n_m = 1,522$ (D) ; $n_p = 1,520$. A. O. dans g^1, passant, à la température de 80°, dans un plan normal à g^1. $2V = 57°,5$; $2E = 92°$. Biss. dans g^1, faisant avec l'arête verticale un angle égal à — 52°32′.

Ch. Réact. 23. Décrépite et blanchit sous la flamme, en se divisant en une multitude de feuillets et finit par fondre difficilement en émail blanc. Réact. 44 ; se change sur le charbon en sulfure de calcium blanc ; donne avec le spath fluor un verre qui devient opaque par refroidissement. Soluble dans 380 à 460 fois son volume d'eau ; peu attaquable aux acides.

Très répandu dans les terrains stratifiés, en masses grenues translucides (*gypse saccharoïde, albâtre*) ; compactes et calcarifères (*pierre à plâtre* de Paris) ; cristallines et jaunâtres (*grignard* et *pieds d'alouette* de Montmartre ; lentilles de gypse en fer de lance) ; en filons fibreux, souvent soyeux, à surfaces ondulées suivant g^1 ; à titre d'efflorescences sur les tas d'argiles calcarifères et pyriteuses.

Etym. : Γύψος, nom ancien du minéral ; nommé aussi *Sélénite* (pierre de lune) dès le temps de Dioscoride.

Epsomite. $H^{14}MgSO^{11}$. — P. S. = 1,75. — D. = 2,25.

S. rhombique. R. A. = 0,990 : 1 : 0,571 ; $mm = 90°34′$.

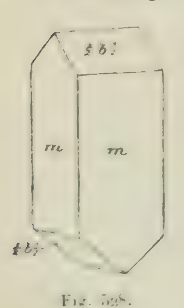


Fig. 528.

Combinaisons : $m, \frac{1}{2}b^1/_2$ (fig. 528), accusant l'hémiédrie holoaxe, avec $mb^1/_2 = 129°3′$ et $b^1/_2\, b^1/_2$ horiz. $= 101°54′$; $mh^1 g^1, \frac{1}{2}b^1/_2$, etc. Clivages : g^1 parfait ; e^1 moins parfait. Incolore, blanche, rouge pâle ; éclat vitreux.

Opt. négative ; $n = 1,482$. A. O. dans p, avec la macrodiagonale pour Biss. $2V = 50°,9$; $2E = 79°$. Saveur salée et amère ; Réact. 23, fournissant une eau très acide. Réact. 80. Soluble dans l'eau.

La **Kiesérite** (dédiée à M. Kieser) est un autre sulfate hydraté de magnésie, H^2MgSO^5, qu'on trouve dans le gîte de Stassfurt.

(1) Quelques auteurs admettent que ce clivage p est produit par la coexistence alternante de deux clivages parallèles aux faces e^1 ($b^1/_2$ de Miller).

P. S. = 2,51. — D. = 5. — S. monoclinique. R. A. = 0,915 : 1 : 1,757 ; $ph^1 = 90°55'$; $b^{1}{}_{2}b^{1}{}_{2} = 101°32'$. — Signe opt. positif. A. O. dans g^1.

Combinée avec la chaux, la magnésie ou la soude, la potasse forme plusieurs sulfates hydratés naturels, notamment :

Syngénite. $H^2K^2CaS^2O^9$. — P. S. = 2,6. — D. = 2,5. — S. monoclinique. R. A. = 1,370 : 1 : 0,874 ; $ph^1 = 104°$; $mm = 73°54'$; clivages m et h^1. Signe opt. négatif ; A. O. dans un plan parallèle à ph^1 ; 2E = 41°,6 (rouge) ; $n_m = 1,55$. Se trouve en Galicie.

Kaïnite. $H^6KClMgSO^7$. — P. S. = 2,13. — D. = 2. — S, monoclinique ; R. A. = 1,219 : 1 : 0,586 ; $ph^1 = 94°55'$. Cette espèce, connue au Vésuve et à Stassfurt, donne naissance, par évaporation, à la **Picroméride** ou **Picromérite**, $H^{12}K^2MgS^2O^{14}$, également monoclinique, avec R. A. = 0,726 : 1 : 0,490 et $ph^1 = 104°48'$.

Löwéite d'Ischl. $H^{10}Na^4Mg^2S^4O^{21}$, espèce quadratique. — P. S. = 2,37. — D. = 2,3 à 3.

Blœdite. $H^8Na^2MgS^2O^{12}$, du même gisement. — P. S. = 2,22 à 2,29. — D. = 3. — S. monoclinique ; R. A. = 1,349 : 1 : 0,670 ; $ph^1 = 100°39'$; $mm = 74°2'$. Signe négatif. A. O. dans g^1 ; $\rho < v$.

Polyhalite de Stassfurt, d'Ischl et de Berchtesgaden.

$$2CaSO^4 + K^2SO^4 + MgSO^4 + 2H^2O,$$

en faisceaux de baguettes prismatiques rouges, mutuellement inclinées de 115°, décomposées par l'eau (P. S. = 2,76. — D. = 2,5 à 3) et donnant, après ébullition, un précipité abondant par le phosphate de soude et d'ammoniaque, ce qui distingue l'espèce de la Glaubérite.

Un groupe assez important est celui des sulfates alumineux. Le premier est la **Webstérite** ou sous-sulfate d'alumine, $H^{18}Al^2SO^{15}$, en masses tuberculeuses, à surface lisse (P. S. = 1,66. — D. = 1 à 2), blanches, mates, douces au toucher, happant à la langue. S. monoclinique. Réact. 23, 44, 81. Facilement soluble dans l'acide chlorhydrique (ce qui la distingue de l'Alunite).

Étym. : Dédiée à M. Webster, qui en a trouvé un gisement à New-Haven, dans une argile ferrugineuse superposée à la craie.

L'**Alunogène**, $H^{36}Al^2S^3O^{18}$, est un autre sulfate naturel, monoclinique, soluble, trouvé au Vésuve et aux États-Unis.

Alunite. $K^2SO^4 + Al^2S^3O^{12} + 2.H^6Al^2O^6$. — P. S. = 2,58 à 2,75. — D. = 3,5 à 4. — S. rhomboédrique : R. A. = 1 : 1,252. $pp = 89°10'$.

Petits cristaux $pe^1e^7{}_{11}a^{22}{}_{21}$, avec clivage a^1 parfait. Plus souvent en masses concrétionnées, mamelonnées et cariées, à cavités tapissées de cristaux et rappelant l'aspect de la pierre meulière. Blanche, grise, jaune ou rougeâtre. Signe opt. positif. $n_e = 1,592$; $n_o = 1,572$.

Ch. Décrépite sans fondre. Réact. 23, 44, 81. A peine attaquée par l'acide chlorhydrique. Traitée par l'eau après calcination, donne, par évaporation modérée, des cristaux octaédriques d'alun.

Se trouve au voisinage des volcans éteints, notamment à la Tolfa, près Civita-Vecchia, et au Mont-Dore.

Les **Aluns** sont des sulfates doubles d'alumine et de diverses bases. Nous n'en citerons que quelques-uns.

Tschermigite ou *alun d'ammoniaque*, $Am^2SO^4 + Al^2S^3O^{12} + 24.H^2O$, cubique (P. S. = 1,5. — D. = 1 à 2), en petites masses fibreuses avec octaèdre a^1. Se volatilise au chalumeau et fond sur le charbon avec Réact. 81.

Alun proprement dit, $K^2SO^4 + Al^2S^3O^{12} + 24H^2O$, également cubique, en efflorescences solubles (P. S. = 1,75. — D. = 2 à 2,5). Fond au chalumeau avec bouillonnement; Réact. 44, 81; soluble dans l'eau; précipite en blanc par le carbonate de potasse.

Mendozite ou *alun de soude*, $Na^2SO^4 + Al^2S^3O^{12} + 24.H^2O$, cubique, en croûtes fibreuses (P. S. = 1,88. — D. = 3).

Pickeringite ou *alun de magnésie*, $MgSO^4 + Al^2S^3O^{12} + 24.H^2O$, en cristaux aciculaires monocliniques (?), blancs, soyeux, efflorescents, de saveur amère et astringente.

Apjohnite ou *alun de manganèse*, $MnSO^4 + Al^2S^3O^{12} + 24.H^2O$, en masses fibreuses donnant les Réact. 47 et 63.

Halotrichite ou *alun de fer*, $FeSO^4 + Al^2S^3O^{12} + 24.H^2O$, également en masses fibreuses, efflorescentes, donnant les réactions 44, 48, 64. Le ***Beurre de Montagne*** en est une variété jaune, d'aspect gras.

PHOSPHATES

Stercorite. $H^{18}Na^2Am^2P^2O^{16}$.

Masses cristallines ou noduleuses, de P. S. = 1,61, solubles dans l'eau bouillante, trouvées sur la côte d'Afrique.

Etym. : ***Stercus***, fumier.

Struvite. $H^{24}Am^2Mg^2P^2O^{20}$. — P. S. = 1,6 à 1,7. — D. = 1,5 à 2. — S. rhombique : R. A. = 0,548 : 1 : 0,621 ; $mm = 122°32'$; $e^1e^1 = 23°41'$ et g^3g^3 sur $g^1 = 95°16'$.

Combinaisons : $h^1(\frac{1}{2}g^1)(\frac{1}{2}e^1)$; $h^1(\frac{1}{2}g^1)(\frac{1}{2}m)(\frac{1}{2}g^3)$. Macles suivant g^1, avec clivages h^1 net, g^1 moins net. Pyroélectrique. Signe opt. positif. Biss. normale à h^1. A. O. dans g^1. $2E = 40°$ à $60°$. $n_m = 1,502$ (D); $\rho < v$.

Fragile, fond au chalumeau en émail, auquel la solution de cobalt commu-

nique une belle teinte pourpre. Soluble dans les acides. Se rencontre dans le guano.

Étym. : Dédiée au ministre russe Struve.

Apatite. $Ca^5P^3O^{12}(Fl,Cl)$. — P. S. = 3,16 à 3,23. — D. = 5 pour les variétés cristallisées ; 4 à 5 pour les autres. — S. hexagonal. — R. A. = 1 : 0,732.

L'analyse donne 91 à 92 % de phosphate de chaux, 0 à 4 de chlorure de calcium et 4,5 à 7,5 de fluorure de calcium.

Combinaisons : pb^1 ; pmb^1 (avec $pb^1 = 139°46'$) ; pma^1b^2 (avec $pb^2 = 157°4'$ et $pa^1 = 124°19'$) ; $mh^2h^1ph^1$; $pma^1b^1b^{1/2}x$ (fig. 529) avec $x = \frac{1}{2}\{b^1 b^{1/2} h^1\}$; cette dernière forme, réduite à moitié, accusant un polyèdre particulaire *hémiaxe principal centré* (1). L'hémiédrie se traduit encore, sur certains cristaux d'apatite, par la réduction à moitié des prismes dodécagonaux h^2 et h^4. Enfin M. Baumhauer l'a mise en évidence par les figures de corrosion qui, sur les faces m, ne sont symétriques que relativement à la direction pm. Les apatites fluorifères sans chlore auraient l'axe vertical un peu plus long que les apatites à chlore.

Clivages : m imparfait ; p plus imparfait.

Incolore, blanche, vert d'asperge (*Spargelstein*), vert de mer, vert bleuâtre, bleu-violacé ; accidentellement grise, jaune, brune, rouge. Poussière blanche. Éclat vitreux, inclinant au résineux. Double réfraction négative. $n_o = 1,646$ (D) ; $n_e = 1,642$. Polychroïque ; anomalies optiques, faisant soupçonner une symétrie rhombique ; phosphorescente en poussière, surtout dans les variétés terreuses.

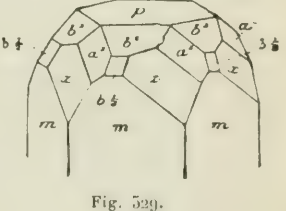


Fig. 529.

Ch. Fond avec difficulté, sur les arêtes minces, en verre incolore et transparent. En poudre, avec oxyde de cuivre et sel de phosphore, donne souvent la réaction du chlore. D'autres fois l'acide sulfurique en chasse de l'acide fluorhydrique. La solution nitrique, faiblement acide, donne avec l'acétate de plomb un précipité de phosphate de plomb, fusible en perle polyédrique.

De très beaux cristaux verts d'apatite, à structure fendillée, se rencontrent dans le terrain archéen du Canada, en prismes hexagonaux pyramidés. Les cristaux de Snarum, blancs et ternes, sont des prismes pyramidés souvent basés.

L'apatite est fréquente dans les gisements stannifères.

L'apatite compacte, à structure radiée, concrétionnée, mamelonnée ou stalactitiforme, constitue la *Phosphorite* du Nassau, du Quercy, etc., recherchée pour l'agriculture. L'*Ostéolite* est une apatite impure et massive, happant à la langue, dont l'aspect rappelle le calcaire lithographique et qui remplit des fentes dans la dolérite et le basalte.

(1) Voir plus haut, p. 142.

Les *nodules phosphatés* du grès vert et de diverses autres formations (lias, craie blanche, etc.) sont surtout formés par un mélange de phosphate et de carbonate de chaux.

L'apatite, en cristaux microscopiques, est fréquente dans les roches éruptives et métamorphiques, où elle se présente toujours en prismes hexagonaux, le plus souvent incolores en plaques minces. En inclusions dans la biotite, l'amphibole et la cordiérite, l'apatite détermine des auréoles polychroïques, moins intenses que celles du zircon. Les variétés vertes, comme celles du Canada et du Valais, contiennent des inclusions à deux liquides, eau et acide carbonique.

Étym. : ἀπατάω, je trompe, à cause des erreurs commises par les anciens minéralogistes, qui l'avaient rapportée au béryl, à la chrysolite, à l'améthyste, à la tourmaline, etc.

Brushite. $H^{10}Ca^{2}P^{2}O^{12}$. — P. S. = 2,2. — D. = 2 à 2,5. — S. monoclinique : R. A. = 0,612 : 1 : 0,351 (1) ; mm = 117°15′ ; ph^1 = 95°15′ ; e^1e^1 sur p = 142°26′.

Clivages faciles g^1 et $a^1/_3$.

Ce phosphate, qui contient 25 à 26 % d'eau, se trouve en masses concrétionnées, formées de petits cristaux aplatis, dans les gîtes de guano (dédiée à M. Brush).

Le *Guano* lui-même est principalement un mélange d'ostéolite et de brushite avec carbonate de chaux, 11 % d'eau et des matières organiques.

C'est encore dans le guano que se trouve la **Bobierrite**. $Mg^{3}P^{2}O^{8} + Aq$, phosphate hydraté de magnésie en masses tuberculées, formées d'aiguilles monocliniques.

Quant à la **Wagnérite**, $2R^{3}P^{2}O^{8} + RFl^{2}$, avec R = (Na^{2},Mg,Ca), elle forme dans le pays de Salzbourg des cristaux jaunes. — P. S. = 2,98 à 3. — D. = 5 à 5,5. — S. monoclinique. R. A. = 0,957 : 1 : 0,753 ; ph^1 = 108°7′ ; mm = 95°24′. Signe opt. positif. A. O. dans g^1 ; 2E = 44°48 (rouge). $\rho > v$. La magnésie y domine (46 %).

Le **Xénotime**, $(Y,Ce,Er)^{2}P^{2}O^{8}$, est remarquable par son isomorphisme avec le zircon. R. A. = 1 : 0,619 (2) ; $b^1/_2\, b^1/_2$ sur m = 82°22′. Les cristaux $mb^1/_2$ sont souvent associés, par groupements réguliers, aux cristaux de Zircon, qui les recouvrent de manière que le prisme de Zircon coiffe exactement le sommet de l'octaèdre de Xénotime, en même temps qu'il y a coïncidence parfaite entre les directions des axes de symétrie des deux espèces. — P. S. = 4,45 à 4,58.

(1) Ce rapport a été adopté par M. Dufet (*Bull. Soc. minér.*, 1888, p. 187) pour mettre en évidence l'isomorphisme de la Brushite avec la Pharmacolite (voir plus loin). — (2) Ce rapport devient 1,238 quand on change $b^1/_2$ en b^1.

— D. = 4 à 5. — Brun, rouge, jaune ; éclat résineux. Signe opt. positif. Infusible. Insoluble dans les acides, $n_o = 1,72$, ; $n_e = 1,81$ (jaune).

Étym. : ξενός, étranger ; τιμή, honneur ; parce qu'on avait cru à tort y découvrir un nouveau métal.

Le Xénotime est le type des minéraux où dominent les terres yttriques (1) ; mais il existe un autre phosphate de la même famille, la *Monazite*, de symétrie monoclinique, où la prédominance appartient aux terres cériques, celles où dominent, d'abord le cerium, puis le lanthane, ensuite le Néodyme, le Praséodyme, enfin le gadolinium (2).

Le sesquioxyde d'uranium, en se combinant avec l'acide phosphorique, donne naissance à deux minéraux, intéressants par la faculté qu'ils ont de former, dans les pegmatites stannifères, des paillettes d'un jaune ou d'un vert très éclatant.

Le premier est l'**Uranite**, $H^{16}CaU^{4}P^{2}O^{20}$, à 5 % de chaux et 15 à 20 d'eau. — P. S. = 3,05 à 3,19. — D. = 2 à 2,5. S. rhombique, mais presque quadratique : R. A. = 0,988 : 1 : 1,426 ; $mm = 90°43'$; $b^{1/2}\,b^{1/2}$ sur $m = 127°32'$; $p\,b^{1/2} = 116°14'$; $p\,a^{1/2} = 109°6'$. Pourvue d'un clivage p très net, l'Uranite, appelée aussi *Autunite*, parce qu'on la trouve près d'Autun, forme des cristaux tabulaires ou des lamelles minces jaune d'or ou jaune de soufre, d'éclat nacré, facilement fusibles au chalumeau. Signe opt. négatif. A. O. dans g^1. Biss. parallèle à h^1g^1. $\rho > v$; $2V = 30°$; $n_g = 1,577$; $n_m = 1,575$; $n_p = 1,553$.

Réact. 23,68. Soluble dans les acides en liqueur jaune, précipitée en jaune par l'ammoniaque caustique.

Le second phosphate est le **Chalcolite** ou *Torbernite*, $H^{16}CuU^{4}P^{2}O^{20}$, quadratique (R. A. = 1 : 1,469 ; $p\,b^{1/2} = 115°53'$; $p\,a^{1/2} = 108°56'$) ; en lamelles $p\,b^{1/2}$, $p\,m\,b^{1/2}$, $p\,a^{1/2}\,b^{1/2}$, avec clivage très facile p. Dans cette espèce, le cuivre remplace le calcium. — P. S. = 3,4 à 3,6. — D. = 2 à 2,5.

Les lamelles sont d'un vert émeraude, vert d'herbe, vert poireau, vert pomme, d'éclat nacré sur p. Signe opt. négatif. Facilement fusible. Réact. 15,23. Avec la soude, sur le charbon, donne un globule de cuivre. Soluble dans l'acide nitrique avec Réact. 126. Traitée par l'acétate de plomb, la solution nitrique donne un précipité de phosphate.

Étym. : χαλκός, cuivre.

FAMILLE DES PHOSPHATES ALUMINEUX

Wavellite. $H^{24}Al^{6}P^{4}O^{31}$. — P. S. = 2,3. — D. = 3,5 à 4. — S. rhombique : R. A. = 0,505 : 1 : 0,375 ; $mm = 126°25'$; a^1a^1 sur $p = 106°46'$.

Cette espèce, où l'analyse révèle 2 % de fluor et 24 à 28 d'eau, se présente

(1) Voir plus haut, p. 492. — (2) Renseignement de M. Urbain.

quelquefois en cristaux $mg^1 a^1$, avec clivages parfaits m et g^1; mais plus souvent en globules radiés, aplatis, formés de fibres très déliées, d'un blanc jaunâtre ou vertes. Signe opt. positif. Biss. normale à p. A. O. dans h^1; $2V = 50°$; $\rho > v$; $n_m = 1,526$; Biréfringence : 0,025.

Étym. : Dédiée au Dr Wavel, auteur de la découverte.

Turquoise. $H^{10}Al^4P^2O^{16}$. — P. S. = 2,6 à 2,8. — D. = 6. — Microcristalline.

La Turquoise, ainsi nommée parce qu'elle a été introduite en Europe par la Turquie, est en masses compactes ou en rognons, remarquables par leur couleur bleu pâle ou vert pomme et composés de très petits grains biréfringents.

L'analyse y donne généralement de 2 a 8 % d'oxyde cuivrique, avec Fe et Ca.

Ch. Décrépite dans le matras, en donnant beaucoup d'eau et devenant brune ou noire. Infusible. Réact. 13,15. Soluble dans l'acide chlorhydrique.

La *Callaïte* (*Callais* de Pline) est de la Turquoise. Quant à la *Callaïnite*, c'est une Turquoise vert émeraude, non cuprifère.

L'*Odontolite* ou fausse turquoise est constituée, comme son nom l'indique, par des fragments de dents ou d'ossements fossiles, pénétrés de phosphate ferrique et de phosphate d'alumine, avec 6 à 7 % de fluorure de calcium. Elle fait effervescence avec les acides et dégage au feu une odeur animale.

Sa couleur est le bleu verdâtre, et souvent elle est formée aux dépens des dents du *Mastodon angustidens*, comme à Simorre en Gascogne.

Klaprothine. $H^6(Mg,Fe,Ca)^3Al^6P^6O^{30}$. — P. S. = 3,05 à 3,12. — D. = 5 à 6. — S. monoclinique : R. A. = 0,965 : 1 : 1,694 (1); $mm = 92°$; $ph^1 = 90°47'$; $d^{1/2}d^{1/2}$ av. = 100°20'; $b^{1/2}b^{1/2}$ arr. = 99°40'; $o^1a^1 = 120°39'$.

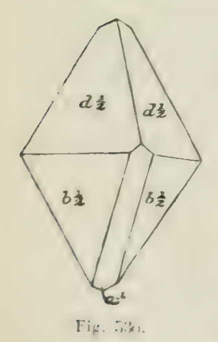


Fig. 530.

L'analyse donne 40 à 47. P^2O^5; 27 35. Al^2O^3; 1 à 10. Fe O; 8 à 13. Mg O; 0 à 4. Ca O; 5 à 6. H^2O.

Combinaisons : $a^1 b^{1/2} d^{1/2}$ (fig. 530); la même avec o^1, o^3, p, m, e^1, e^2; macles de deux cristaux du premier type, associés suivant p ou suivant h^1.

Bleu d'azur (d'où les noms de *Lazulite* et de faux Lapis), bleu indigo, bleu de Prusse. Éclat vitreux. Polychroïque. bleu foncé dans une direction, bleu verdâtre dans les autres. Signe opt. négatif. A. O. dans g^1; Biss. inclinée de 70° sur normale à o^1; $\rho < v$. $2V = 69°$; $n_g = 1,639$; $n_m = 1,632$; $n_p = 1,603$ (D). Se décolore dans le matras avec Réact. 23. Infusible. Réact. 15, 64, 81, 48. Dédiée à Klaproth. Se trouve avec quartz et sidérose.

(1) La dernière édition de Dana indique 1,648 pour l'axe vertical, et 0,975 au lieu de 0,965 pour la brachydiagonale.

Amblygonite. $2Al^2P^2O^8 + 3$ Li,Na Fl. — P. S. = 3 à 3,1. — D. = 6. — S. triclinique : R. A. = 0,245 : 1 : 0,461 ; angles : *xy* avec *yz* = 68°47′ ; *yx* avec *yz* = 98°44′ ; *zx* avec *zy* = 85°52′ ; *mt* = 151°4′ ; *mp* = 105°44′ ; *tp* = 95°20′.

L'amblygonite, où il y a de 8 à 10 % de fluor, avec 6 à 8 de lithine, se présente en cristaux lamellaires, formés de bandes hémitropes, avec clivage *m* et joints de facile séparation suivant *p*. La couleur varie du blanc verdâtre au blanc rosé. Éclat vitreux sur *m* et *p*, nacré sur *t*. Facilement fusible. Réact. 1 et 5. Peu attaquable. Se trouve en masses laminaires à Montebras (Creuse), associée aux gisements d'étain.

Etym. : ἀμβλὺς, obtus, et γῶνος, angle, à cause de la valeur de l'angle *m t*.

Le nom de *Montebrasite* avait été donné d'abord à un fluophosphate d'alumine, vert pâle ou gris de cendre, accompagnant l'Amblygonite à Montebras. L'identité des deux espèces a été reconnue depuis. Mais Des Cloizeaux a proposé d'appliquer le nom de Montebrasite à l'Amblygonite d'Hébron (États-Unis), et à une variété semblable de Montebras, riche en eau, pour laquelle on a $\rho < v$, tandis que, dans la véritable Amblygonite, on a $\rho > v$. De plus, cette variété ne contient pas de soude et est exclusivement lithinifère (9 à 10 %). M. von Kobell a proposé de la désigner sous le nom d'*Hébronite*.

Dans les deux espèces, la Biss. est négative et coïncide à peu près avec l'arête *pm*. Dans la Montebrasite, le plan A. O. fait, dans l'angle obtus *pm*, un angle de 23° avec la trace *p*. Dans l'Amblygonite, c'est le plan $n_p\ n_m$ qui occupe cette position.

On a d'ailleurs : Amblygonite : 2V = 50 à 55° ; $n_g = 1{,}597$; $n_m = 1{,}593$; $n_p = 1{,}578$. Montebrasite d'Hébron : 2V = 50 à 90° ; $n_g = 1{,}620$; $n_m = 1{,}611$; $n_p = 1{,}600$.

ARSÉNIATES, ANTIMONIATES

Pharmacolite. $H^{12}Ca^2As^2O^{13}$. — P. S. = 2,64 à 2,73. — D. = 2 à 2,5. — S. monoclinique : R. A. = 0,612 : 1 : 0,361 ; *mm* = 117°24′ ; ph^1 = 96°46′.

Formes *p*, *m*, h^2, g^1, e^1, etc. Cristaux généralement aciculaires, allongés suivant pg^1. Clivage facile g^1. Ordinairement mamelonnée ; blanche, grise ou colorée en rose par l'arséniate de cobalt. Éclat vitreux ; flexible. Réact. 23. Sur le charbon, fond avec forte odeur arsenicale. Insoluble dans l'eau, soluble dans les acides.

Etym. : φαρμακόν, poison, parce qu'elle contient de l'arsenic.

La **Durangite** est un arséniate d'alumine, soude, fer, manganèse, avec fluor, en petits cristaux d'un rouge orangé, trouvé à Durango (Mexique), S. monoclinique. R. A. = 0,772 : 1 : 0,822 ; *m m* = 110°10′ ; $p\ h^1$ = 115°13′.

De même qu'il existe deux phosphates d'urane, l'un rouge et l'autre vert, de même il existe deux arséniates. Le premier est la **Trögerite**, $H^{24}U^3As^2O^{26}$, monoclinique (R. A. = 0,70 : 1 : 0,42; ph^1 = environ 100°), en petites tables d'un jaune citron, de P. S. = 3,3. Le second est la **Zeunérite**, $H^{16}CuU^2As^2O^{20}$, (P. S. = 3,53. — D. = 2,5), quadratique (R. A. = 1 : 1,456), clivable suivant *p*, isomorphe avec la Chalcolite, dont elle possède la couleur verte et l'éclat nacré.

Ces deux arséniates se trouvent dans les mêmes conditions de gisement que les phosphates correspondants.

Roméine. $(Ca, Fe, Mn)^2Sb^3O^8$. — P. S. = 4,67 à 4,71. — D. = 5,5.

La Roméine se présente en octaèdres ressemblant à l'octaèdre régulier, mais formés, selon M. Bertrand, par le groupement, autour d'un même point, de huit rhomboèdres d'environ 90 degrés (1), tandis que d'autres y reconnaissent une symétrie quadratique (R. A. = 1 : 1,029) avec clivages *m* et h^1. Jaune de miel ou rouge hyacinthe, donnant sur le charbon d'épaisses fumées blanches d'antimoine, elle est insoluble dans les acides. On la trouve en compagnie du minerai de manganèse à Saint-Marcel (Piémont).

Étym. : Dédiée à Romé de l'Isle.

La **Stibioferrite**, $H^6Sb^2Fe^2O^{19}$, est un antimoniate contenant 3,85 °/₀ de Fe^2O^3, trouvé en enduits jaunes amorphes sur la Stibine, en Californie.

TUNGSTATES, TITANATES, TANTALATES, NIOBATES

Schéelite. $CaWO^4$. — P. S. = 5,9 à 6. — D. = 4,5 à 5. — S. quadratique : R. A. = 1 : 1,5335; a^1a^1 = 130°39′ sur h^1; b^1b^1 sur m = 113°47′.

Combinaisons : a^1xy (fig. 531), où $x = \frac{1}{2}\{b^1/_2 b \frac{1}{15} h^1/_3\}$ et $y = \frac{1}{2}\{b^1 b^1/_3 h^1\}$, accusant l'hémiédrie; la même avec a^2 et $b^3/_2$, etc. La Schéelite ou *schéelin calcaire* possède un clivage a^1 assez distinct. Blanche ou jaune, d'éclat vitreux adamantin, de signe optique positif, avec n_e = 1,934, elle fond difficilement au chalumeau. Réact. 56, 72, 92. Réduite en poudre et traitée par l'acide nitrique bouillant, elle laisse un résidu jaune d'acide tungstique. Accompagne les minerais d'étain et de cuivre.

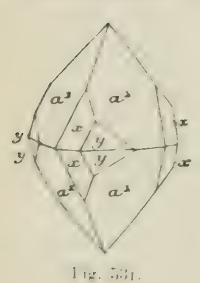


Fig. 531.

Étym. : Dédiée à Scheele, qui découvrit le tungstène.

La **Cuproschéelite**, $CuCa^2W^3O^{12}$, est un tungstate de chaux avec 7 °/₀ de protoxyde de cuivre, de couleur vert pistache ou vert olive, trouvé dans la Basse-Californie.

(1) Em. Bertrand, *Bull. Soc. minér.*, 1881, p. 240.

Perowskite. $CaTiO^3$. — P. S. = 3,99 à 4. — D. = 5,5.

La symétrie apparente de la Perowskite est cubique, comme l'indiquent les clivages; mais les observations de MM. des Cloizeaux et de Kokscharow, confirmées par les expériences de corrosion de M. Baumhauer, ont établi que cette apparence était due à des groupements compliqués de cristaux rhombiques (R. A. = 1 : 1 : 0,707). Indice = 2,35. Biréfringence : 0,006 à 0,007. Cette substance, noir grisâtre ou noir de fer, infusible au chalumeau, peu attaquable par les acides, donne la réaction 53. On la trouve dans des chloritoschistes et des calcaires cristallins.

Étym. : Dédiée à Perowski.

Près de la Perowskite, avec laquelle on l'a d'abord confondue, se place la *Dysanalyte*, ou titano-niobate de chaux, en petits cubes d'un noir de fer; cette espèce forme la transition de la Perowskite au Pyrochlore. On la trouve dans le calcaire au Kaiserstuhl.

La *Polymignite* est un titano-zirconate de fer et de chaux, yttrium, cerium, etc., en cristaux rhombiques dans la syénite éléolitique de Norvège.

Yttrotantalite ou **Yttrotantale**. $(Y, Ce, Fe, U, Ca)^3 (Ta, Nb)^4O^{11}$. — P. S. = 5,4 à 5,9. — D. = 5 à 5,5. — S. rhombique : R. A. = 0,541 : 1 : 1,133. mm = 123°12′; pe^1 = 131°26′.

Ce tantaloniobate, où domine de beaucoup l'yttria, est en cristaux noirs, bruns ou jaunes, aplatis suivant g^1, à éclat métalloïde. Infusible au chalumeau, inattaquable par les acides, il se dissout dans le sel de phosphore.

Tantalite. $(Fe,Mn) (Ta,Nb)^2O^6$. — P. S. = 7,8 à 8. — D. = 6 à 6,5. — S. rhombique : R. A. = 0,817 : 1 : 0,652. mm = 113°48′; $b^1/_2b^1/_2$ adj. = 126°1′; en avant = 112°26′ sur m.

Cette espèce, qui contient 32 à 76. Ta^2O^5; 7 à 40. Nb^2O^5; 0,2 à 3. SnO^2; 13 à 16. FeO; 1 à 3. MnO, forme des cristaux allongés, où dominent les faces m, g^2, g^1, $h^7/_0$, $e^4/_9$. D'un noir de fer, avec poussière brune ou noire, opaque et infusible, elle donne la Réact. 48. Si, après l'avoir fondue avec l'hydrate de potasse dans un creuset d'argent, on reprend par l'eau, on obtient, en neutralisant la liqueur par l'acide chlorhydrique, un précipité d'acide tantalique, qui devient blanc après ébullition avec l'acide sulfurique étendu. Si l'on ajoute du zinc métallique, le précipité prend une teinte bleue, qu'il perd promptement par addition d'eau. Inattaquable aux acides.

La **Tapiolite** est une espèce de formule identique avec la précédente, mais quadratique et isomorphe avec le Rutile, dont la formule triplée Ti^3O^6 correspond bien à celle de la Tantalite. — P. S. = 7,3 à 7,5. — D. = 6. — R. A. = 1 : 0,646; $b^1/_2b^1/_2$ = 84°48′ sur m.

On a donné les noms de **Baierine**, **Niobite** et **Columbite** à un minéral rhombique (R. A. = 0,815 : 1 : 0,669), de formule $Fe(Nb,Ta)^2O^4$, contenant 51 à 78 d'acide niobique, 3 à 35 d'acide tantalique, 13 à 17 d'oxyde ferreux, 3 à 7 d'oxyde manganeux. — P. S. = 5,4 à 6,5. — D. = 6.

Dana réserve le nom de Columbite au Niobate, celui de Tantalite au Tantalate, les deux espèces passant graduellement l'une à l'autre.

Combinaisons : $h^1mg^1pe^1/_2$; $h^1h^5/_2h^3h^4mg^2a^6b^1/_2$; clivages : h^1 net, g^1 assez distinct. La Baierine est noire ou brune, d'éclat imparfaitement métallique, de cassure conchoïdale ou inégale, se comportant au chalumeau comme la Tantalite. On la trouve dans des roches granitiques en Bavière (d'où le nom de Baierine), au Groenland, à Chanteloube (Haute-Vienne), en Auvergne, à Miask, etc.

Pyrochlore. — S. cubique. — P. S. = 5,40 à 5,56. — D. = 5,5.

Le Pyrochlore est un niobate ou niobotitanate de chaux, dans la composition duquel entrent de l'uranium, du manganèse, du cérium, du thorium et du fer. Les cristaux, ordinairement très petits, sont octaédriques ou offrent la combinaison $pa^1a^2a^3$. Clivage a^1. Couleur brune. Éclat vitro-résineux. Infusible. Inattaquable par l'acide chlorhydrique. Le Pyrochlore se trouve dans la syénite éléolitique en Oural et en Norvège.

Etym. : πῦρ, feu, et χλωρός, vert, parce qu'il donne avec le sel de phosphore une perle verte au feu de réduction.

La **Fergusonite** est un autre niobate ou niobotantalate, quadratique (R. A. = 1 : 1,464), de formule $(Y, Ce, U, Fe, Ca)^3Nb^2O^8$, avec formes hémiédriques. — P. S = 5,8 à 5,84. — D. = 5,5 à 6. Noire ou brune, infusible, la Fergusonite se rencontre au Groenland et en Suède.

La **Samarskite** $(U, Fe,Y)^5Nb^2O^{10}$, de Miask (Oural), est rhombique (mm = 122°46′; R. A. = 0,545 : 1 : 0,571), noire ou brune, et fusible sur les bords. — P. S. — 5,5 à 5,8. — D. = 5 à 6.

Le **Polycrase**, dont l'*Euxénite* forme une variété, est un titanoniobate d'yttrium, de cerium et d'uranium, tandis que l'**Æschynite** est un titanoniobate de thorium, cerium, lanthane, didyme, yttrium, fer, calcium. Ces deux minéraux sont rhombiques; le premier avec R. A. = 0,486 : 1 : 0,674. — P. S. = 5,1 à 5,2. — D. = 5,5; le second avec R. A. = 0,364 : 1 : 0,303. — P. S. = 4,6 à 5. — D. = 6,5.

DEUXIÈME ORDRE

SELS HALOIDES

CHLORURES

Sylvine. KCl. — P. S. = 1,9 à 2. D. = 2. — S. cubique.

Formes : *p*, a^1 ; clivage *p* parfait. Incolore, blanche, à éclat vitreux, soluble, sans réaction alcaline. Indice : 1,49 (D). Fusible, Réact. 4,19. Se trouve à Stassfurt et au Vésuve.

Étym. : C'est le *sal digestivus Sylvii* des anciens chimistes, d'où Beudant a tiré le nom de Sylvine.

Sel gemme. NaCl. — P. S. — 2,1 à 2,2. — D. = 2,5. — S. cubique.

La forme est presque toujours celle du cube, rarement celle du rhombododécaèdre b^1 ou de b^2. L'octaèdre et le cubo-octaèdre ne s'obtiennent que par cristallisation artificielle. Quelquefois les cristaux ont les faces creuses, en forme de trémies. Clivage *p* parfait. Incolore et limpide quand il est pur ; fréquemment coloré en gris, jaune, rouge, plus rarement en bleu ou vert. Plusieurs de ces colorations sont détruites par la chaleur. Éclat vitreux. Remarquablement diathermane. Indice : 1,544 (D). Saveur salée caractéristique. Soluble. Décrépite et fond facilement dans le tube. Réact. 5 et 98. La corrosion y fait naître des trémies dont les côtés sont parallèles aux arêtes *b*.

Le sel gemme ou *Halite* forme, subordonné à des argiles, des gisements étendus dans divers terrains stratifiés. Il imprègne le sol de certaines steppes et est émis en abondance par les laves très chaudes, au voisinage de leurs points d'éruption. Le sel gemme grenu contient souvent des cavités en forme de cristaux cubiques *négatifs*.

On trouve habituellement dans le sel gemme de 0,5 à 1 °/₀ de sulfate de chaux, 0 à 0,5 de sulfate de magnésie et 0 à 0,5 de chlorure de potassium.

Carnallite. $KCl + MgCl^2 + 6H^2O$. — P. S. = 1,6 — D. = 1. — S. rhombique ; pseudo-hexagonale. R. A. = 0,597 : 1 : 1,389 ; $mm = 118°37'$.

Cette substance, connue à Stassfurt et en Perse, se présente en masses grenues ou en sphéroïdes d'un blanc de lait ou rouge pâle. Cristaux $mg^1 pb^1/_2 b^3/_4 e^1/_2 e^3/_4$, $(b^1/_2 b^1/_2 = 107°10')$; à formes voisines de la symétrie hexagonale. Très phosphorescente, soluble, facilement fusible, avec Réact. 4 et 98.

Étym. : Dédiée à M. von Carnall.

Salmiac. H^4AzCl ou AmCl. — P. S. = 1,528. — D. = 1,5 à 2. — S. cubique.

Le salmiac ou *sel ammoniac* se trouve dans le voisinage des volcans ou près des houillères embrasées. Les formes observées sont p, a^1, b^1, a^2, a^3 ; quelquefois huit des faces de a^3 prédominent au point de simuler un hémidioctaèdre du système quadratique. Clivage a^1.

M. Tschermak a montré que le salmiac accusait, par ses stries et ses figures de corrosion, une hémiédrie holoaxe portant sur l'hexoctaèdre (578) = $\{b^{\frac{1}{5}} b^{\frac{1}{7}} b^{\frac{1}{8}}\}$.

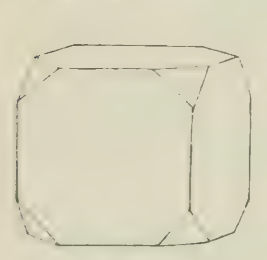
Blanc, jaune ou gris. Éclat vitreux, saveur piquante. Non déliquescent. Volatil sans fondre. Soluble. Pulvérisé et mêlé avec chaux ou chauffé avec soude caustique, exhale une forte odeur d'ammoniaque.

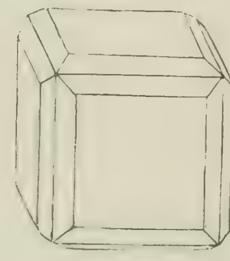
La **Chlorocalcite** $CaCl^2$ est un chlorure de Ca, avec Na,K, à symétrie cubique, observé au Vésuve, et la **Tacchydrite** ou **Tachydrite**, qui répond à la formule $CaCl + MgCl^2 + 6.\ H^2O$, forme à Stassfurt des masses globuleuses jaunes, de P. S. = 1,67, rapidement déliquescentes, d'où le nom de l'espèce (ταχύς, rapide). On lui attribue une symétrie hexagonale avec R. A. = 1 : 1,9.

FLUORURES

Fluorine $CaFl^2$. — P. S. = 3,18 à 3,188. — D. = 4. — S. cubique.

Combinaisons habituelles : p ; pa^1 (fig. 532) ; pb^1 ; pb^2 (fig. 533) ; pb^3 ; $pb^{\frac{5}{2}}$; p avec un hexoctaèdre (fig. 534), de notation $\{b^1 b^1/_2 b^1/_4\}$; $\{b^1 b^1/_3 b^1/_7\}$; $\{b^1/_3 b^1/_4 b^1/_{10}\}$, etc. ; a^1 ; pa^1. Macle fréquente par pénétration de deux cubes,


Fig. 532.


Fig. 533.

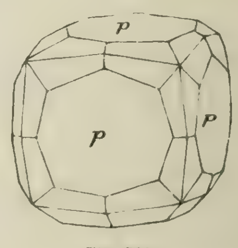


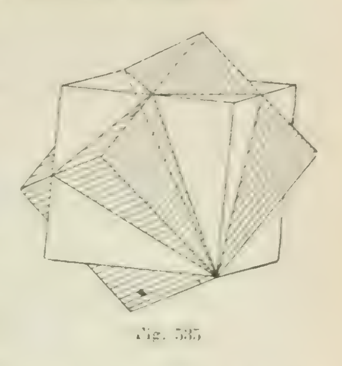
Fig. 534.

ayant en commun une diagonale (fig. 535) autour de laquelle l'un d'eux aurait tourné de 60 degrés.

Les faces p portent souvent des stries qui figurent des pyramides quadrangulaires très surbaissées. Clivage parfait suivant a^1, très marqué dans les plaques minces.

Mallard considère la fluorine comme pseudocubique, avec symétrie réelle sénaire.

La fluorine forme aussi des variétés concrétionnées, composées de couches alternativement blanches et violettes ou vertes, à contours dentelés.


Fig. 535

Blanche, jaune, verte, violette, bleue, bleu de ciel, rose. Éclat vitreux, un peu gras. Fluorescente. Les couleurs, souvent disposées dans un même échantillon par zones, ont été attribuées à des carbures d'hydrogène (1); mais nous avons précédemment fait valoir (p. 293) le rôle qu'y jouent les éléments des terres rares. Indice : 1,434. Anomalies optiques. La variété dite *Chlorophane* émet, sous l'influence de la chaleur, de belles lueurs vertes. Décrépite dans le tube; fond sur le charbon en émail et colore la flamme en jaune rougeâtre. Avec le carbonate de soude, donne une perle transparente à chaud, opaque à froid. Attaquable par l'acide sulfurique, avec dégagement d'acide fluorhydrique. Soluble dans l'acide chlorhydrique.

Son gisement habituel est dans les filons métallifères. Le *Spath fluor*, comme on l'appelle, est utilisé comme fondant en métallurgie.

Au même groupe appartiennent la **Sellaïte**, $MgFl^2$, quadratique et pseudocubique (R. A. = 1 : 0,590), qui est de tous les minéraux connus le moins réfringent, et l'**Yttrocérite** ou **Yttrocalcite**, (Ca, Ce, Y) Fl^2, en masses cristallines bleuâtres. La **Fluocérine** ou **Fluocérite** Ce^4Fl^3 paraît être hexagonale. Rouge brique ou jaune (P. S. = 4,7), elle noircit sans fondre sur le charbon.

Enfin la **Fluellite** est un fluorure hydraté d'aluminium, $Al^2Fl^6H^4O^2$, en octaèdres aigus tronqués, dérivés d'un prisme rhombique de 105°. R. A. = 0,77 : 1 : 1,854.

Il existe toute une catégorie de fluorures doubles, où l'aluminium peut être associé à la soude, à la chaux ou à la magnésie. M. Groth les classe de la façon suivante (2) :

1° FLUORURES DOUBLES ANHYDRES

Cryolite. $6NaFl + Al^2Fl^6$. — P. S. = 2,9 à 3. — D. = 2,5 à 3. — S. triclinique : $ml = 91°57'$; $tp = 90°2'$; $mp = 90°24'$.

Clivage très net suivant t; moins net suivant m et p. Habituellement en masses laminaires clivables, d'un blanc de neige, parfois jaunes ou noirâtres. Éclat vitreux, un peu nacré sur p. Semi-transparente, surtout après immersion.

(1) Wyrouboff. *Bull. Soc. chimique*, 1866. La variété violet foncé de Quincié (Rhône) contient du fluor libre (Becquerel et Moissan). — (1) Voir *Bull. Soc. minéral.*, 1883, p. 72.

Signe opt. positif. Plan A. O. parallèle à l'axe *b*. Fusible à la flamme d'une bougie en colorant la flamme en jaune. Devient opaque en se solidifiant. Chauffée avec l'acide sulfurique, dégage beaucoup d'acide fluorhydrique.

Se trouve au Groenland, en filon dans le gneiss, le plus souvent avec pyrite, cassitérite, galène, fluorine et cristaux disséminés de sidérose en rhomboèdres blonds.

Etym. : κρύος, glace.

M. Krenner considère la Cryolite comme monoclinique avec $mm = 91°57'$ et $ph^1 = 90°11'$. (R. A. = 0,966 : 1 : 1,388). Les formes dominantes seraient p, m, $b^{1/2}$, a^1, e^1.

Pachnolite. $(Na, Ca)^2Fl^3 + Al^2Fl^6$. — P. S. = 2,92. — S. monoclinique. R. A. = 1,163 : 1 : 1,532 ; $ph^1 = 90°20'$. Dans le matras, dégage des vapeurs acides. Pulvérisée et promptement calcinée, émet d'épaisses fumées blanches; soluble à chaud dans l'acide chlorhydrique. Accompagne la cryolite. Signe opt. positif.

Chiolite. $10NaFl + 3Al^2Fl^6$. — P. S. = 2,84 à 2,89. — D. = 4. — S. quadratique. R. A. = 1 : 1,042. Blanc de neige. Aussi fusible que la cryolite. Trouvée à Miask, dans les monts Ilmen, avec topaze, fluorine et cryolite. Signe opt. négatif.

Prosopite. $CaFl^2 + 2Al^2(Fl. HO)^6$. — P. S. = 2,89. — D. = 4,5. — S. monoclinique (ou triclinique.) R. A. = 1,318 : 1 : 0,591 ; $ph^1 = 86°2'$. Trouvée à Schlaggenwald dans les mines d'étain.

2° FLUORURES DOUBLES HYDRATÉS

Thomsenolite. $(Na, Ca)^2 Fl^3 + Al^2 Fl^6 + 2.H^2O$ — P. S. = 2,74 à 2,76. — D. = 2,5 à 4. — S. monoclinique. R. A. = 0,996 : 1 : 1,089 ; $ph^1 = 89°,37'$. $\rho < v$.

En masses encore plus fusibles que la cryolite, rappelant l'aspect de la calcédoine et associées à la cryolite du Groenland.

Ralstonite. $3(Na^2, Mg, Ca) Fl^2 + 8. Al^2Fl^6 + 6H^2O$. — P. S. = 2,62. — Parait cubique, avec cristaux octaédriques; mais, en lumière convergente, se comporte comme un cristal à deux axes, offrant les mêmes groupements que le grenat aplome (1). Donne dans le tube un sublimé blanc abondant; blanchit sans fondre dans la pince de platine, en colorant la flamme en jaune. Accompagne la Cryolite et la Thomsenolite.

(1) Em. Bertrand, *Bull. Soc. minéral.*, 1881, p. 34.

QUATRIÈME SECTION

DESCRIPTION DES MINÉRAUX DU TROISIÈME GROUPE OU MINERAIS MÉTALLIQUES

PREMIER ORDRE

MINÉRALISATEURS

Sous le titre de *Minéralisateurs,* nous comprenons les substances à la faveur desquelles les métaux lourds peuvent prendre la forme de *Minerais.* Dans le nombre il en est, comme l'oxygène, le chlore, le fluor, qui échappent au cadre de notre étude, parce que la nature ne nous les offre pas à l'état solide. Parmi les autres, nous distinguerons deux classes.

1° Les *Minéralisateurs proprement dits*, c'est-à-dire ceux qui peuvent former avec les métaux des combinaisons non oxygénées. Ce sont le soufre, le sélénium, le tellure, l'arsenic et l'antimoine, que nous étudierons d'abord à l'état natif, puis sous forme de combinaisons entre eux et avec l'oxygène.

2° Les *métaux acidifiables,* c'est-à-dire le molybdène, le vanadium, le chrome, le tungstène et le manganèse. Ce sont déjà des métaux, et trois d'entre eux nterviennent dans les arts métallurgiques par l'acier au chrome, l'acier au tungstène et l'acier au manganèse. Mais ils ne sont pas utilisés à l'état isolé et, de plus, ils ont la propriété de former avec l'oxygène de véritables acides, qui s'unissent à d'autres métaux et, en particulier, aux métaux lourds, pour donner naissance à des minerais, molybdates, vanadates, chromates, tungstates, manganates et permanganates; par là ils rentrent, au moins à titre d'appendice, dans la catégorie des corps minéralisateurs. Nous étudierons donc à part ce qu'on peut appeler les minerais de cette catégorie de métaux (1).

(1) Le bismuth pourrait, à divers égards, figurer dans cette division : mais sa densité considérable et l'emploi qui en est fait dans les alliages métalliques fusibles nous engagent à le laisser parmi les métaux proprement dits.

PREMIÈRE CLASSE

MINÉRALISATEURS PROPREMENT DITS

ÉLÉMENTS MINÉRALISATEURS

Soufre. S. — P. S. = 1,9 à 2,1. — D. = 1,5 à 2,5. — S. rhombique : R. A. = 0,813 : 1 : 1,903. $mm = 101°46'$; $pe^1 = 117°41'$ (1).

Combinaison habituelles : $b^1/_2$ avec $b^1/_2 b^1/_2$ adj. = 85°8′ sur e^1 ; 106°26′ sur a^1, et 134°20 sur m ; $pb^1/_2 b^3/_2 e^1$ (fig. 536) avec $e^1e^1 = 124°34'$ sur g^1 ; $pb^1/_2 = 108°20'$; $pb^3/_2 = 134°50'$; $pa^1 mg^1e^1e^3b^1/_2 b^3/_2 b^5/_2$; quelquefois (fig. 537) quatre des faces $b^1/_2$ prédominent sur les quatre autres, donnant au cristal une apparence sphénoédrique (Sicile). Macles avec plan d'assemblage parallèle à m, quelquefois à e^1 et à a^1. Faces e^1 en général ternes et raboteuses. Clivage imparfait suivant m. Cassure nettement conchoïdale. Jaune de soufre, jaune miel, gris et brun. Éclat adamantin sur les faces, résineux dans la cassure. Poussière jaune. Double réfraction énergique, positive, facile à constater directement sur les cristaux transparents. A. O. dans g^1. 2V = 69°,5. Biss. normale à p : $n_g = 2{,}24$; $n_m = 2{,}04$; $n_p = 1{,}59$. $\rho < v$.

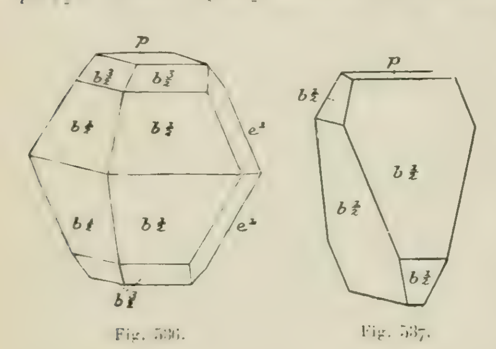


Fig. 536. Fig. 537.

Mauvais conducteur de l'électricité ; s'électrisant négativement par le frottement. Fusible à 113°, volatil à 450° ; à l'air, s'enflamme à 270° en produisant de l'acide sulfureux. Soluble dans le sulfure de carbone, d'où l'évaporation précipite de beaux cristaux rhombiques, tandis que les aiguilles du soufre cristallisé par fusion sont monocliniques (2).

Le soufre, quelquefois mélangé de sélénium ou de matières bitumineuses, se trouve, en amas stratiformes, associé au gypse, en diverses contrées ; en cristaux avec célestine, gypse, aragonite et calcite en Sicile ; en efflorescences dans les solfatares volcaniques, etc.

Le **Sélénium** natif a été trouvé, paraît-il, au Mexique. Il est monoclinique avec R. A. = 0,991 : 1 : 1,270 et $ph^1 = 89°15'$.

(1) D'un grand nombre de mesures exécutées sur des cristaux de Perticara, M. Bombicci a déduit récemment (*Accad. di Bologna*, 1895) R. A. = 0,813 : 1 : 1,909 ; $mm = 101°5'$; $b^1/_2 b^1/_2$ adj. = 85°7′ ; sur a^1 = 106°12′ ; sur m = 143°28′ ; $pb^1/_2 = 108°36'$; $pb^3/_2 = 134°22'$. — (2) Pour le dimorphisme du soufre, voir plus haut, pp. 369, 372.

Tellure. Te. — P. S. = 6,1 à 6,3. — D. = 2 à 2,5. — S. rhomboédrique : R. A. = 1 : 1,3298. $pp = 86°57'$.

Combinaison $pe^1{}_2e^2a^1$; clivage e^2 parfait ; a^1 imparfait. Éclat métallique ; blanc d'étain tirant sur blanc d'argent. Très fusible. Donne dans le tube ouvert un sublimé blanc d'acide tellureux, se résolvant par la chaleur en gouttelettes limpides et incolores. Cet oxyde colore la flamme en vert. Sur le charbon, laisse une auréole blanche, bordée de rouge. Entièrement soluble dans l'acide azotique. Réact. 91.

Ordinairement massif ou en lames à structure grenue.

La **Tellurine** ou acide tellureux TeO^2 accompagne le Tellure en Hongrie. Les cristaux, groupés en sphères fibreuses, sont de symétrie rhombique ($mm = 130°35'$; $g^1b^1/_2 = 108°7'$).

Arsenic. As. — P. S. = 5,7 à 5,9. — D. = 3,5. — S. rhomboédrique : R. A. = 1 : 1,402. $pp = 85°4'$ (1).

Cristaux très rares ; ordinairement en masses grenues, compactes, fibreuses ou testacées. Clivage a^1 parfait. Éclat métallique. Blanc d'étain ou gris ; gris noir. Volatil avec odeur d'ail. Donne sur le charbon un dépôt blanc.

Antimoine. Sb. — P. S. = 6,6 à 6,7. — D. = 3 à 3,5. — S. rhomboédrique : R. A. = 1 : 1,323, $pp = 81°7'$.

Cristaux rares, ordinairement pa^1a^2 (fig. 538), avec $a^2a^1 = 159°20'$. Clivage a^1 très net ; b^1 moins parfait ; tous deux avec stries parallèles à a^1b^1. Macles de deux rhomboèdres par hémitropie normale à b^1.

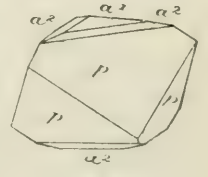


Fig. 538.

Souvent en masses réniformes ou testacées. Très fragile. Blanc d'étain ; éclat métallique. Thermoélectrique, surtout avec bismuth.

Dans le tube ouvert, donne un sublimé blanc non cristallin ; sur le charbon, fond facilement en donnant un enduit blanc d'oxyde Sb^2O^3.

COMBINAISONS MUTUELLES DES ÉLÉMENTS MINÉRALISATEURS

GENRE ARSENIC

Orpiment. As^2S^3. — P. S. = 4,4 à 3,5. — D. = 1,5 à 2. — S. rhombique : R. A. = 0,829 : 1 : 1,12. $mm = 100°40'$; $pe^1 = 131°45'$ (2).

Combinaison $mh^1h^3g^1g^3e^1$ avec { $b^1b^1/_3g^1$ }. Clivage parfait g^1, à éclat nacré,

(1) En adoptant pour forme primitive de l'arsenic le rhomboèdre de 68°20', noté e^1, M. G. Friedel fait ressortir une symétrie limite-cubique, l'angle du rhomboèdre du système cubique à faces centrées étant de 70°32'. Il en est de même pour l'antimoine. — (2) Mohs a admis R. A. = 0,603 : 1 : 0,674 ; $mm = 117°49'$; mais M. Miers prend $mm = 100°33'$.

moins facile h^1. Cristaux courts, peu nets et rares; ordinairement masses lamellaires d'un jaune d'or ou jaune orangé très vif, flexibles quand elles sont minces, sectiles.

Opt. Signe positif. A. O. dans p. Biss. normale à h^1; $2E = 70°$ (D); $\rho > v$.

Fusible et volatil; soluble dans l'eau régale et aussi dans une lessive de potasse. Fond dans le tube fermé, en donnant un enduit rouge brun qui devient jaune au bout de quelque temps ou par le frottement. Dans le tube ouvert, fond, dégage des vapeurs de soufre et donne, dans les parties froides du tube, un enduit cristallin d'acide arsénieux. Sur le charbon, émet des fumées blanches, en répandant à la fois l'odeur du soufre et celle de l'arsenic.

Se trouve dans des filons en Hongrie, notamment à Tajowa.

Etym. : *Auri pigmentum*, couleur d'or.

Réalgar. AsS ou As^2S^2. — P. S. = 3,4 à 3,6. — D. = 1,5 à 2. — S. monoclinique : R. A. = 1,440 : 1 : 0,973; $mm = 74°26'$; $ph^1 = 66°5'$; $pm = 104°12'$.

Combinaison $mh^3g^1e^2pb^1/_2$ (fig. 539) avec $pe^2 = 156°2'$. Clivages nets g^1 et p.

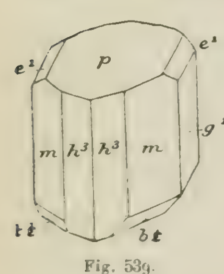


Fig. 539.

Faces g^1 et m striées verticalement. Les cristaux forment en général des prismes très courts, chargés de facettes. Couleur rouge aurore ou rouge cochenille; poussière rouge orangé. Double réfraction négative A. O. dans g^1. Biss. à — 77° de pg^1. $\rho > v$. Dispersion inclinée. Polychroïque.

Se volatilise complètement dans le tube fermé en donnant un sublimé rouge transparent. Les autres réactions comme celles de l'orpiment.

Se trouve en jolis cristaux dans la dolomie du Binnenthal, en grands cristaux dans les filons transylvaniens, en masses compactes avec orpiment en Hongrie.

Etym. : Réalgar est un mot anciennement employé par les alchimistes.

L'**Arsénolite** ou **Arsénite**, As^2O^3, est de l'acide arsénieux naturel. Elle se présente en croûtes cristallines, incolores ou blanches, quelquefois en octaèdres, et possède la symétrie cubique, avec clivage a^1. Indice : 1,745 (D).

P. S. = 3,7. — D. = 1,5. Entièrement volatile dans le matras. Réact. 46. Difficilement soluble dans l'eau. Soluble dans l'acide chlorhydrique.

Allemontite. — S. rhomboédrique. — P. S. = 6,13 à 6,20. — D. = 3,5.

Cette substance, d'un blanc d'étain, parfois gris noir, ordinairement en masses testacées, grenues et compactes, avec clivage facile a^1, contient à Allemont, près des Chalanches (Isère), 62,15 % d'arsenic pour 37,85 d'antimoine, ce qui correspondrait à Sb As^3. Elle donne, dans le tube fermé, un sublimé d'arsenic métallique, en laissant un résidu métallique fusible. Sur le charbon, il se forme un enduit blanc avec forte odeur d'ail. Attaquable par l'acide nitrique.

GENRE ANTIMOINE

Stibine. Sb^2S^3. — P. S. = 4,6 à 4,7. — D = 2. — S. rhombique : R. A. = 0,992 : 1 : 1,018. $mm = 90°26'$.

La stibine se présente en masses bacillaires, en aiguilles ou en longs cristaux prismatiques striés, ordinairement formés des faces m et g^1, et terminés tantôt par la pyramide $b^1/_2$, avec $mb^1/_2 = 145°19'$ et $b^1/_2 b^1/_2 = 110°38'$ sur p, tantôt par une pyramide $b^3/_2$, avec $mb^3/_2 = 115°43'$. Quelquefois (fig. 540) la combinaison $mb^1/_2$ est accompagnée des deux facettes d'une brachypyramide e_3. Au Japon, le pointement est formé par la macropyramide $b^1b^1/_2h^1/_3$, dont les faces font un angle de 93°5'.

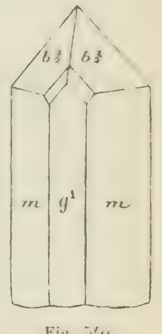


Fig. 540.

Clivage g^1 parfait. Faces de clivage souvent courbes. Cassure inégale ; éclat métallique ; gris de plomb ou gris d'acier ; surface souvent irisée.

Ch. Fusible à la flamme simple de la bougie. Dans le tube fermé, il se volatilise un peu de sulfure, noir à chaud, rouge jaunâtre à froid. Se grille aisément dans le tube ouvert, en donnant de l'oxyde d'antimoine volatil et de l'antimoniate d'oxyde infusible et fixe, en même temps que des vapeurs d'acide sulfureux. Sur le charbon, fond très vite et finit par donner un enduit blanc. Avec la soude, fournit, outre l'enduit blanc, des globules blancs, cassants. Attaquable par les acides.

Etym. : *Stibium*, antimoine.

La **Berthiérite** est un sulfure d'antimoine avec 9 à 16 % de fer, qui répond à la formule $FeSb^2S^4$ et forme des baguettes d'un noir de fer. P. S. = 4 à 4,3. — D. = 2 à 3. Sur le charbon, après volatilisation de l'antimoine à l'état d'oxyde, donne un globule magnétique. Se distingue de la stibine parce que, après attaque par l'acide azotique, elle laisse un résidu jaune au lieu d'un résidu blanc.

Etym. : Dédiée à Berthier.

Sénarmontite. Sb^2O^3. — P. S. = 5,22 à 5,3. — D. = 2 à 2,5. — S. cubique.

En octaèdres blanchâtres et translucides, formés, paraît-il, de 24 pyramides monocliniques. Clivage a^1 assez net. Éclat résineux. Se sublime dans le matras ; sur le charbon, facilement fusible et volatile avec enduit blanc. Soluble dans l'acide chlorhydrique. Indice : 2,073.

En cristaux et masses compactes ou grenues en Algérie.

Etym. : Dédiée à H. de Sénarmont.

Exitèle ou **Valentinite**. Sb^2O^3.

Cette espèce, de composition identique avec la Sénarmontite, accuse le dimorphisme de l'oxyde d'antimoine ; car elle est rhombique avec R. A. =

0,3914 : 1 : 0,3367 (1); $mm = 137°15'$. Les cristaux sont souvent aplatis suivant g^1, avec clivages g^1 parfait, m facile. Translucides, d'éclat adamantin, nacré suivant g^1, blancs ou jaunâtres, fréquemment assemblés en fibres rayonnantes, ils ont P. S. = 5,57. — D. = 2,5 à 3. Leurs réactions sont celles de la Sénarmontite.

Opt. Signe négatif. Dispersion très forte $\rho > v$. A. O. dans p pour le rouge, dans g^1 pour le bleu. Biss. normale à h^1.

Etym. : ἐξίτηλος, vaporisable. Valentinite vient de Basile Valentin, alchimiste du XVIIe siècle, qui découvrit les propriétés de l'antimoine.

La **Cervantite**, Sb^4O^8, qui paraît devoir être considérée comme un produit d'altération de la Stibine, est rhombique, en fines aiguilles, infusible et non volatile, avec P. S. = 4,08 et D. = 4 à 5.

Quant à la **Stiblite**, c'est un hydrate $H^4Sb^4O^{10}$ (P. S. = 5,28. — D. = 4 à 5,5) en masses terreuses jaunes, accompagnant la Stibine.

La **Kermésite** ou le **Kermès minéral** est un oxysulfure d'antimoine monoclinique, $2Sb^2S^3 + Sb^2O^3$, avec 4 ou 5 % seulement d'oxygène ; d'un rouge cerise ou mordoré, en aiguilles cristallines monocliniques (R. A. = 1 : x : 1,479) allongées suivant a^1h^1, pourvues d'un clivage h^1 parfait, avec $ph^1 = 102°9'$; $pa^1 = 115°28'$. P. S. = 4,5 à 4,6. — D. = 1 à 1,5. Ses réactions sont celles de la Stibine.

Etym. : Nom donné à cause de la couleur du minéral, qui est celle du *Kermès* des pharmaciens.

DEUXIÈME CLASSE

MINERAIS DES MÉTAUX ACIDIFIABLES

GENRE MOLYBDÈNE

La **Molybdine** (**Molybdite**) ou *Molybdénocre*, MoO^3, est de l'acide molybdique naturel, trouvé en masses fibreuses ou enduits pulvérulents d'un jaune paille, à éclat soyeux. (P. S. = 4,49 à 4,5. — D. = 1 à 2). Fusible au chalumeau. Réact. 17. Très soluble dans l'acide chlorhydrique. La forme cristalline, déterminée seulement sur des cristaux artificiels, est le prisme rhombique de 137°39'. La molybdine se trouve ainsi isomorphe avec la Valentinite ; mais son signe est positif.

On connaît encore, sous le nom d'**Ilsemannite**, un molybdate d'oxyde de molybdène, soluble dans l'eau, d'un noir bleuâtre et résultant de l'altération de molybdates métalliques.

(1) M. Lacroix adopte 0,3927 : 1 : 1,3888, avec $mm = 137°7'$.

Molybdénite. MoS^2. — P. S. = 4,44 à 4,8. — D. = 1 à 1,5.

La Molybdénite, dont la symétrie cristalline est encore douteuse, pouvant être hexagonale, rhombique ou même monoclinique, se présente en cristaux tabulaires de forme hexagonale, parfois avec les arêtes de la base affectées par un biseau de 105°, mais plus souvent en lamelles cristallines ou en masses foliacées d'un gris de plomb bleuâtre, à éclat métallique très vif. Très flexible, mais non élastique, recevant l'empreinte de l'ongle, elle laisse sur le papier une trace grise et sur la porcelaine un trait de nuance verdâtre. Son toucher est gras.

Ch. Réact. 30. Infusible, colorant la flamme en vert clair. Sur le charbon, réact. 38. Avec l'acide nitrique concentré, en ébullition, donne une masse blanche en partie soluble dans la potasse à chaud. La liqueur, acidifiée par l'acide chlorhydrique et agitée avec un barreau d'étain, se colore en bleu.

La molybdénite accompagne souvent les pegmatites stannifères, les granites, les syénites zirconiennes. On la trouve le plus habituellement en mouches dans un quartz compact et laiteux.

GENRE VANADIUM

La **Vanadine** ou *acide vanadique*, V^2O^5, est une substance pulvérulente, jaune, formant des enduits sur le cuivre natif du Lac Supérieur. Elle est très rare.

La **Vanadiolite** du lac Baïkal est un composé d'acide vanadique et de chaux avec silice, magnésie et alumine, en petits cristaux indéterminés, vert foncé ou vert émeraude (P. S. = 3,96).

GENRE CHROME

Chromite. (Fe,Mg) (Cr,Al)$^2O^4$. — P. S. = 4,32 à 4,56. — D. = 5,5. — S. cubique.

La chromite ou *fer chromé* (*Sidérochrome*), où la proportion d'oxyde chromique est de 44 à 64 %, la magnésie variant de 0 à 18 et l'oxyde ferreux de 19 à 38, se présente en petits octaèdres a^1, mais le plus souvent en masses grenues, d'un noir de fer un peu brunâtre, avec clivage octaédrique imparfait, à poussière brune et à éclat demi-métallique. Inattaquable, infusible. Réact. 48,65. Se trouve associée à la serpentine et, comme cette dernière, dérive généralement du péridot ; on suppose que le chrome de ce minéral a passé, dans la transformation, à l'état de chromite (1).

En lames minces, la chromite n'est pas opaque ; sa nuance est le jaune mélangé de rouge et sa surface se montre chagrinée.

La chromite est, par sa composition comme par son mode de cristallisation, un membre de la famille des spinellides, à laquelle elle se relie par la variété

(1) Tschermak, *Lehrbuch*, p. 405.

connue sous le nom de *Chromopicotite*, à 56,5 % d'acide chromique et 12 d'alumine (P. S. = 4,11. — D. = 8).

Etym. : χρῶμα, couleur, à cause des riches couleurs offertes par les oxydes du chrome.

Le **Chromocre** a été longtemps regardé comme un oxyde chromique impur, mélangé de silicates d'alumine, formant des enduits terreux, d'un vert plus ou moins franc, soit à la surface du fer chromé, soit dans l'Arkose des Écouchets, près du Creusot. Il est infusible au chalumeau. Réact. 49. Nous l'avons classé, conformément aux vues actuelles des minéralogistes, avec le mica muscovite (1).

GENRE TUNGSTÈNE

La **Wolframine** ou *Wolframocre* est de l'acide tungstique WO^3; elle est terreuse, jaune ou vert jaunâtre, infusible. Réact. 72,92. Soluble dans les alcalis, insoluble dans les acides. Elle accompagne les gîtes de wolfram.

Wolfram. (Me,Fe)WO^4. — P. S. = 7,1 à 7,55. — D. = 5 à 5,5. — S. monoclinique (2) ; R. A. = 0,830 : 1 : 0,868. $mm = 100°37'$; $e^1e^1 = 98°6'$; $ph^1 = 90°38'$.

Combinaisons : $h^1g^1a^2e^1b^1/_2$ (fig. 541) ; $mh^3h^1a^2o^2e^1e^3/_2$ (fig. 542) ; $mh^3h^1e^1d^1/_2b^1/_2$; ces trois formes étant fréquentes à Chanteloube, tandis qu'à Zinnwald on observe aussi g^3 et que la base p se rencontre à Altenberg. Macles par accolement suivant h^1, avec angle rentrant a^2a^2 de 126°, ou suivant $e^3/_2$. Clivage parfait g^1, imparfait h^1. Gris sombre, noir brunâtre. Poussière brun noir. Fusible. Réact. 72, 92, 93.

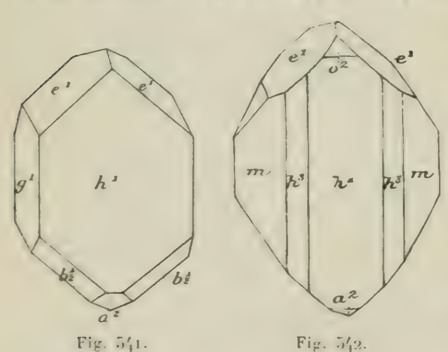


Fig. 541. Fig. 542.

Le manganèse et le fer peuvent entrer, chacun pour 5 à 20 %, dans la composition du wolfram, où la proportion d'acide tungstique reste de 74 à 76 %.

Le wolfram, le plus souvent en masses lamelleuses intimement associées au quartz hyalin, accompagne les minerais d'étain. Il est utilisé pour la préparation de l'acier au tungstène.

Etym. : Wolfram est la traduction allemande de *lupi spuma*, écume de loup, dénomination déjà usitée du temps d'Agricola (1546). Haüy avait désigné l'espèce sous le nom de *Scheelin ferruginé*.

On désigne sous le nom de **Hübnérite** un tungstate de manganèse presque pur, à 76,4 % WO^3 et 23,4 MnO, cristallisant en prisme rhombique de 101°5',

(1) Voir plus haut, p. 477. — (2) D'après G. Rose, le wolfram serait rhombique.

avec clivage parfait g^1 (P. S. — 7,14. — D. = 4,5). Ce minéral, rouge brunâtre, difficilement fusible, est très rare. On le trouve engagé dans le quartz.

GENRE MANGANÈSE

MINERAIS NON OXYDÉS

Alabandine. MnS. — P. S. = 3,95 à 4,04. — D. = 3,5 à 4. — S. cubique.

Combinaisons : p, a^1, avec macle des spinelles, tantôt simple, tantôt cruciforme par accolement de cinq octaèdres. Le plus souvent en masses ou enduits d'un noir de fer avec poussière vert poireau et trois clivages rectangulaires également faciles. Réact. 30, 47, 63, 93.

Étym. : Alabanda en Carie, où cette espèce se trouve.

La **Hauérite**, MnS^2 (dédiée à M. de Hauer), est un bisulfure également cubique, présentant la combinaison $pa^1b^1b^3$, associée à $\{b^1b^1/_2b^1/_3\}$. — P. S. = 3,46. — D. = 4. Ce minéral, brun rougeâtre, à éclat semi-métallique inclinant vers l'adamantin et poussière rouge brunâtre, dépose dans le tube fermé un sublimé de soufre. Réact. 47, 63, 93. Se trouve en Hongrie.

On le rencontre aussi à Radduza en Sicile, sous forme de beaux octaèdres ou cubo-octaèdres noirs, faciles à confondre avec la magnétite, mais présentant parfois les symptômes de l'hémiédrie hémiaxe qui caractérise la pyrite jaune de fer.

La **Kanéite** (dédiée à M. R. J. Kane, de Dublin) serait un arséniure de manganèse MnAs, d'un blanc grisâtre, trouvé en Saxe. — P. S. = 5,55.

OXYDES

Polianite. MnO^2. — P. S. = 4,7 à 5. — D. = 6 à 6,5.

S. quadratique. R, A. = 1 : 0,952 (1) ; b^1b^1 adj. = 133°32′ ; a^1a^1 adj. = 121°41′.

La Polianite a été longtemps considérée comme une variété très pure de Pyrolusite (voir ci-dessous), de symétrie rhombique. Les récents travaux de MM. Ed. Dana et S. Penfield (2) ont montré que la Polianite était réellement quadratique et tout à fait isomorphe avec le Zircon, le Rutile et la Cassitérite.

Quant à la **Pyrolusite**, elle passait jusqu'à cette découverte pour la forme normale de l'oxyde MnO^2. On la regardait comme rhombique avec R. A. = 0,938 : 1 : 0,728 ; mm = 93°40′ ; e^2p = 160°. Les cristaux, ordinairement courts, offrent les combinaisons pmh^3, $pmh^1g^1e^2$, etc. Striés verticalement, ils sont très souvent décomposés en aiguilles ou en faisceaux de fibres cristallines, clivables suivant m, g^1 et h^1. Leur dureté n'est que de 2 à 2,5.

(1) Ce rapport devient 1 : 0,6732 quand, avec les auteurs allemands, on change m en h^1. — (2) *Amer. Journ.* [3], XXXV, p. 243.

Pourvus de l'éclat métallique, ils sont opaques, d'un noir de fer ou d'un gris d'acier sombre, quelquefois un peu bleuâtre. Leur poussière est noire ou d'un noir bleuâtre. Ils tachent souvent les doigts, conduisent bien l'électricité et renferment de 1 à 3 °/₀ d'eau.

Il est reconnu aujourd'hui (et les essais de reproduction artificielle de M. Gorgeu ont pleinement justifié cette manière de voir) que la Pyrolusite des anciens minéralogistes est simplement une pseudomorphose d'Acerdèse, cette dernière espèce (dont il sera question un peu plus loin) perdant son eau et gagnant de l'oxygène sans que rien soit changé à ses formes extérieures (1).

L'oxyde MnO^2 est infusible et dégage de l'oxygène, comme il est facile de le constater à l'aide d'une allumette à demi éteinte, placée à l'extrémité du tube de verre dans lequel on chauffe cet oxyde. Sur le charbon, le minéral perd 12 °/₀ d'oxygène et se transforme en Hausmannite. Réact. 47, 63, 93. Soluble dans l'acide chlorhydrique avec dégagement de chlore.

Le nom de la *Pyrolusite* vient de πῦρ, feu, et λύω, délier, parce qu'elle perd de l'oxygène par la chaleur (2). On emploie ce minéral pour faire disparaître les teintes du verre. Aussi l'a-t-on qualifié, dans l'industrie, de *savon des verriers*.

Braunite. Mn^2O^3 ou $(MnSi)O^2RO$ (Gorgeu), R étant un ensemble d'oxydes parmi lesquels Mn est largement prédominant. — P. S. = 4,7 à 4,9. — D. = 6 à 6,5.

S. quadratique. R. A. = 1 : 0,985 ; $b^1/_2 b^1/_2$ = 108°39′ sur p, et $b^1/_2 b^1/_2$ adj. = 109°53′ ; c'est-à-dire que l'octaèdre quadratique de l'espèce diffère à peine de l'octaèdre régulier. Petits cristaux $b^1/_2$ et $pb^1/_2$. Clivage $b^1/_2$ parfait, excepté dans la variété *Marceline* (de Saint-Marcel en Piémont). Noir brunâtre foncé ; poussière de même teinte. Très fragile. Réactions de la pyrolusite.

La Braunite est presque toujours mélangée de silice (0 à 7 °/₀), et Rammelsberg la considère comme le produit du mélange de l'oxyde Mn^2O^3 avec le silicate $MnSiO^3$.

La *Marceline* ou *Hétérocline* contient 10 °/₀. Fe^2O^3 et 10. SiO^2.

M. Igelstroem croit que le silicate MnO^2. SiO^2 fait partie constituante de diverses braunites, telles que celles de Jacobsberg, Langban, Elgersberg. Leur symétrie serait peut être rhomboédrique.

Etym. : Dédiée à M. Braun, de Gotha.

Hausmannite. Mn^3O^4. — P. S. = 4,7 à 4,9. — D. = 5 à 5,5.

S. quadratique. R. A. = 1 : 1,174 ; $b^1/_2 b^1/_2$ = 116°59′ sur m ; $a^1 a^1$ = 98°32′ sur h^1. Petits cristaux octaédriques $b^1/_2$, souvent avec stries parallèles aux

(1) Cette conclusion, soupçonnée par Breithaupt, a été nettement formulée en 1887 par M. Kœchlin, qui a reconnu dès cette époque que la polianite était le seul bioxyde de manganèse qui eût une forme cristalline propre. — (2) Certains auteurs disent λύω, *dissoudre*, à cause de l'action dissolvante de la pyrolusite sur les impuretés du verre.

arêtes b; macles fréquentes parallèlement à a^1, parfois répétées. Clivages : p facile ; $b^1/_2$ et a^1 moins faciles.

Souvent en masses cristallines grenues. Noir brunâtre; poussière brun rouge; éclat métallique; cependant, translucide en lames minces. Ne perd pas d'oxygène par la chaleur et se comporte pour le reste comme les autres oxydes du manganèse. Contient toujours de 1 à 8 °/₀ de zinc.

Etym. : Dédiée au minéralogiste Hausmann.

Acerdèse. $H^2Mn^2O^4$ ou ($MnO^2.MnO.H^2O$).—P.S=4,2 à 4,4.—D.=3,5 à 4.

S. rhombique, R. A. = 0,844 : 1 : 0,545. mm = 99°40′; $b^1/_2 b^1/_2$ = 130°49′ sur a^1. Combinaisons : mp; mpa^1; mg^3a^1; $mh^2g^3b^1/_2$; la même avec $a^1, g^1, e^1, e^1/_2$; $mh^2g^3g^1b^1/_2$ avec plusieurs autres facettes telles que e^1, $e^1/_2$, etc. (fig. 543). La macropyramide ($b^1b^1/_3h^1/_2$) est très fréquente. Macles suivant e^1. Clivages : g^1 très facile. m moins facile; p imparfait.

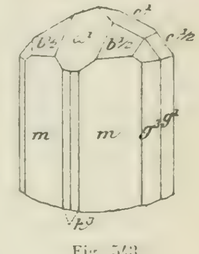


Fig. 543.

L'Acerdèse ou *Manganite* se présente à l'état de cristaux prismatiques, striés ou cannelés longitudinalement, ainsi qu'à l'état fibreux ou massif. Cassante, elle est d'un gris foncé, presque noir, et possède quelquefois un aspect très brillant. Poussière d'un brun rougeâtre, parfois presque noire (surtout quand l'espèce est altérée et tend à se changer en pyrolusite). Par la chaleur, perd 9 °/₀ d'oxygène. Infusible. Réact. 23, 47, 63, 93. Soluble dans l'acide chlorhydrique avec dégagement de chlore. Se distingue de la pyrolusite par la couleur de sa poussière et l'eau qu'elle abandonne au-dessus de 200 degrés.

Opt. négative, A. O. dans p. Biss. normale à g^1. $\rho > v$.

Les propriétés chimiques de l'Acerdèse ont conduit M. Gorgeu à l'envisager comme un manganite acide hydraté. Un grillage entre 275° et 310° la transforme en pyrolusite.

Etym. : ἀκερδής, *peu lucratif*, à cause de l'infériorité industrielle de cet oxyde relativement à la pyrolusite, qui contient 27 °/₀ de plus d'oxygène.

La **Pyrochroïte**, H^2MnO^2, est un autre oxyde hydraté, de symétrie hexagonale, en masses lamellaires, disséminées par veines dans la magnétite. Ces masses sont blanches, mais brunissent à l'air pour noircir ensuite. Optiquement négative, la Pyrochroïte devient verte, puis gris verdâtre, et enfin brun noir au chalumeau.

Psilomélane. — P. S = 4,1 à 4,3. — D. = 5,5 à 6.

Cette espèce (*manganèse oxydé hydraté barytifère*), qui n'est connue qu'en masses concrétionnées, stalactitiques, réniformes ou compactes, offrant assez souvent, dans la cassure, un aspect analogue à celui des empreintes de fougères, est une combinaison d'oxyde hydraté de manganèse avec de la baryte ou de la

potasse. L'analyse donne 64 à 81. Mn^3O^4; 11 à 17. O; 0 à 17. BaO; 3 à 6. H^2O; 0 à 5. K^2O. La lithine y est quelquefois présente (1).

La couleur est le noir de fer inclinant au gris d'acier, avec tendance au bleuâtre. Poussière d'un noir brunâtre. Très difficilement fusible, décrépite, donne de l'oxygène dans le tube fermé. Réact. 23 et réactions ordinaires des oxydes de manganèse. Colore la flamme tantôt en vert (baryte), tantôt en violet (potasse). Soluble dans l'acide chlorhydrique, avec dégagement de chlore.

Etym. : ψιλός, glabre, et μέλας, noir; parce que, avec la couleur noire des autres oxydes, la psilomélane n'affecte pas la forme aciculaire ou fibreuse.

Sous le nom de **Wad**, on désigne des composés très variables d'oxydes hydratés de manganèse, ordinairement terreux, mais parfois à séparations prismatiques, en masses noires, tachant souvent les doigts, de P. S. = 3, à 4,25 et D. = 0,5 à 3.

On peut rapporter au Wad les dendrites noires, si fréquentes sur les parois des fissures des calcaires compacts.

On distingue dans le Wad :

1° Le *Bog-Manganèse* ou *Écume de manganèse* (*Manganschaum*), qui peut contenir 38 à 82 % d'oxydes de manganèse, 0 à 52 d'oxyde ferrique, 5 à 31 d'eau. Cette variété comprend la *Groroïlite* (2) de Grazay (Mayenne), en masses terreuses d'un brun chocolat, à 17 % d'eau;

2° La *Lampadite*, qui renferme de 4 à 16 % de protoxyde de cuivre;

3° L'*Asbolane*, qui, par la forte proportion d'oxyde de cobalt qu'elle contient (19 à 32 %), mériterait d'être décrite avec les minerais du cobalt, si les oxydes de manganèse n'y étaient en proportion dominante (31 à 41 %). Cette variété donne une perle bleue avec le sel de phosphore.

Etym. : Le nom de Wad est d'origine anglaise; on l'emploie aussi, assez mal à propos, dans les mines du Cumberland, pour désigner le graphite.

OXYSELS

Dialogite. $MnCO^3$. — P. S. = 3,3 à 3,6. — D. = 3,5 à 4,5.

S. rhomboédrique : R. A. = 1 : 0,818; $pp = 107°1'$.

L'espèce, qui fait partie de la série des carbonates rhomboédriques, isomorphes avec la calcite, offre les combinaisons p; pb^1; a^1p; a^1d^1; $e^4/_3a^1$; $d^2e^1b^3$. Faces p lisses, mais courbes; base a^1 arrondie et caverneuse. Clivage p parfait. Cassure inégale. Éclat vitreux, passant au nacré. Rose pâle, rose vif, rouge de chair; brunit à l'air.

Réfringence énergique; signe opt. négatif.

(1) M. Laughaus, considérant la baryte comme à l'état de mélange, donne à la psilomélane la formule H^4MnO^5. — (2) Ce nom résulte d'une erreur de transcription, le créateur de l'espèce, Berthier, ayant lu *Groroy* au lieu de *Grazay*.

Ch. Infusible, décrépite et devient gris verdâtre ou noire. Réact. 47. En poudre ou en menus fragments, soluble à froid dans l'acide chlorhydrique, avec une légère effervescence.

Se présente en petits cristaux, souvent d'apparence lenticulaire, à cause de la courbure des faces du rhomboèdre dominant p; en globules et en masses mamelonnées. Contient généralement un peu de fer, de chaux et de magnésie, grâce à son isomorphisme avec les autres carbonates. La *Manganocalcite* est une variété pouvant contenir de 10 à 18 °/₀ de carbonate de chaux et 3 °/₀ de carbonate de fer.

Etym. : Le nom de Dialogite, souvent écrit, mais à tort, *Diallogite*, dérive de διαλογή, doute (Dana). On le remplace quelquefois par celui de *Rhodochrosite*, tiré de la couleur rose du minéral.

La **Fausérite**, $H^{30}MgMn^2S^3O^{27}$, est un sulfate de manganèse avec magnésie (5 °/₀) contenant jusqu'à 44 °/₀ d'eau, qui se forme journellement dans les galeries des mines de Herrengrund (Hongrie). Les cristaux sont rhombiques, avec $mm = 91°18'$ (Dana), et clivage g^1 distinct. Ils sont d'un blanc rougeâtre ou blanc jaunâtre, solubles et de saveur amère, astringente. P. S. = 1,89. — D. = 2 à 2,5.

Etym. : Dédiée à M. Fauser.

Hureaulite. $H^{10}(Mn,Fe)^5P^4O^{20}$. — P. S. = 3,18 à 3,2. — D. = 5. — S. monoclinique; R. A. = 1,698 : 1 : 0,889; $ph^1 = 90°33'$; $mm = 61°$ (1).

Combinaison : mh^1e^1; petits cristaux isolés ou groupés, masses compactes ou fibreuses, incolores, jaunes, brunes, roses. Éclat vitreux; transparente ou translucide. Signe opt. négatif; 2H = 85° (rouge). Biss. normale à g^1. Soluble dans les acides; fusible au chalumeau en perle jaune rougeâtre, avec coloration verte dans la flamme oxydante. Réactions du fer (le minéral contient 6 à 11 °/₀ d'oxyde ferreux) et du manganèse (32 à 42 °/₀ d'oxyde manganeux).

Etym. : Hureaux, près Limoges.

Triplite. $(Fe,Mn)^3P^2O^8 + (Fe,Mn)Fl^2$. — P. S. = 3,44 à 3,8. — D. = 4 à 5,5. — S. rhombique ou monoclinique.

Se rencontre en masses cristallines, sans formes reconnaissables, avec trois clivages à peu près rectangulaires, inégaux (d'où son nom). Brun noir; éclat résineux. Cassure subconchoïdale. Poussière jaune brun. Signe optique négatif.

Ch. Facilement fusible en globule magnétique. Réact. 47, 48. Soluble dans l'acide chlorhydrique; avec l'acide sulfurique, dégage de l'acide chlorhydrique.

Se trouve dans les pegmatites de la Haute-Vienne.

(1) Dana adopte R.A. = 1,919 : 1 : 0,524, avec $mm = 55°18'$; $ph^1 = 95°59'$.

La **Triphyline**, $Li^6(Fe,Mn)^6P^6O^{24}$, contient plus de fer que de manganèse et cristallise en prisme rhombique (R. A. = 0,435 : 1 : 0,526; $mm = 133°$; $e^2e^2 = 87°3$) avec clivage p facile. — P. S. = 3,54 à 3,6. — D. = 5. Signe opt. positif. A. O. dans p. Biss. normale à g^1.

Grands cristaux et masses gris verdâtre ou gris bleuâtre; facilement fusible, Réact. 1 et 15.

Etym. : τρίς, trois fois, et φυλή, famille, parce qu'elle contient trois phosphates.

L'**Hétérosite** des pegmatites de Chanteloube (Haute-Vienne), qui doit son nom à ce que sa composition a d'abord été méconnue, et l'**Alluaudite** (dédiée à Alluaud) du même gisement, sont des phosphates hydratés de manganèse et de fer. Le dernier possède, comme la triplite, trois clivages inégaux.

Rhodonite, $MnSiO^3$. — P. S. = 3,61 à 3,63. — D. = 5,5 à 6,5. — S. triclinique : R. A. = 1,155 : 1 : 0,610, $mt = 85°38'$; $ph^1 = 111°8'$; $a^1/_3h^1 = 142°32'$; $c^1/_3g^1 = 148°47'$ (1).

Combinaisons : pmt; $pmth^1o^1a^1$; $mh^1tpg^1a^1/_3e^1/_3$, etc. Clivages h^1 et g^1 parfaits. Transparente ou translucide. A la loupe dichroscopique, les faces g^1 donnent une image rose rouge et l'autre vert bleuâtre. Couleur rose fleur de pêcher, rose rouge. Biss. négative. Indice : 1,73. Biréfringence : 0,01 ; $\rho < v$. Forte dispersion tournante. Facilement fusible, réactions du manganèse ; décolorée et plus ou moins facilement attaquée par les acides.

Etym. : ῥόδον, rose.

La *Pajsbergite* du Wermland est la variété la plus nettement cristallisée. Les Rhodonites de Przibram et de Franklin sont lamellaires. La *Fowlérite* est une variété peu fusible et zincifère du New-Jersey. La *Bustamite* du Mexique est calcifère et en nodules radiés, fibro-lamellaires.

La Rhodonite de l'Oural, avec petites veines noires de pyrolusite, est utilisée pour la fabrication de vases d'ornement. Une variété d'un rose plus clair se trouve dans les Pyrénées.

En s'altérant ou en se mélangeant avec du quartz, du carbonate de manganèse et de l'oxyde manganeux, la rhodonite donne naissance à diverses substances (*Allagite*, *Hornmangan*, *Opsimose*, etc.).

On connaît à Adervielle, dans les Hautes-Pyrénées, un chloro-silicate hydraté de manganèse, la **Friedélite** (dédiée à M. Friedel). Ce minéral est translucide, à éclat gras et d'un rouge carmin plus foncé que celui de la rhodonite. Il ne renferme que 36 % SiO^2, au lieu de 46 que contient la rhodonite, et on y trouve près de 8 % d'eau. S. rhomboédrique : R. A. = 1 : 0,562 ; $pp = 123°42'$. Clivage p facile. Signe opt. négatif. Biréfringence énergique.

(1) M. Groth, pour mieux faire ressortir l'analogie de la rhodonite avec le pyroxène, prend h^1 pour t et g^1 pour m, avec l'angle mutuel de 87°38'. M. Flink donne R. A. = 1,073 : 1 : 0,621 avec $mm = 87°32'$.

DEUXIÈME ORDRE

MINERAIS DES MÉTAUX PROPREMENT DITS

MINERAIS DE FER

FER NATIF

Fer. Fe. — P. S. = 7,3 à 7,8. — D. = 4,5. — S. cubique.

Formes $p, a^1, a^1/_2$. Clivages rares, suivant p ou a^1.

Fusible seulement à 1500°. Attaquable par l'acide chlorhydrique. Réact. 111.

Le fer natif d'origine terrestre a été trouvé dans le Groenland, à Ovifak, où il formait de gros blocs empâtés dans le basalte. Ce fer natif est allié au carbone, dont la proportion s'élève jusqu'à 4 ou 5 %. Il est aussi combiné au soufre et au nickel. Le diamant existe dans le fer natif de Canyon Diablo (Arizona).

Un fer nickelé tellurique, l'**Awaruite** (P. S. = 8,1. — D. = 5), de formule Ni^2Fe, a été récemment rencontré, en grains finement disséminés, dans une serpentine de la Nouvelle-Zélande.

En dehors des cas qui viennent d'être cités, les blocs de fer recueillis à la surface du globe proviennent de météorites.

Le *fer météorique* contient toujours une notable quantité de nickel (jusqu'à 20 %) et, en outre, du chrome, du cobalt, du silicium, du phosphore, du soufre, même de l'hydrogène. Sa structure est manifestement cristalline, et comporte l'assemblage polysynthétique de quatre sous-individus cubiques, maclés avec un cube principal, a^1 étant le plan d'accolement. Souvent des lames d'un phosphure de fer, plus difficilement attaquable que le fer lui-même, y sont régulièrement interposées; aussi l'attaque par les acides fait-elle naître à la surface des fers météoriques des figures en réseau, connues sous le nom de *figures de Widmanstætten*.

Ce phosphure de fer a reçu le nom de **Schreibersite**. Il est nickélifère, en grains et paillettes d'un gris d'acier, magnétique. — P. S. = 7,01 à 7,22 — D. = 6,5. L'analyse donne généralement 55 à 57 %. Fe; 25 à 28. Ni; 11 à 15. P, avec un peu de carbone, soit $(Fe,Ni^3)P$.

MINERAIS NON OXYDÉS

SULFURES

Le protosulfure de fer, FeS, n'a encore été rencontré que dans les météorites, où il se présente en masses d'un brun tombac, à poussière noire. On lui a donné le nom de **Troïlite**. — P. S. = 4,75 à 4,82. — D. = 4.

Etym. : Dédiée à Domenico Troïli.

Pyrrhotine. — P. S. = 4,54 à 4,64. — D. = 3,5 à 4,5. — S. hexagonal. R. A. = 1 : 0,870 ; $pb^1 = 134°52'$.

La Pyrrhotine ou *Pyrite magnétique* (ainsi nommée parce qu'elle est magnétique, même parfois magnétipolaire) offre une composition comprise entre Fe^6S^7 et $Fe^{11}S^{12}$. Elle est rarement cristallisée, en cristaux hexagonaux aplatis $pmh^1a^2b^1b^2$, avec clivage p parfait, m moins facile. Le plus souvent elle se présente en masses grenues, compactes, quelquefois à structure remarquablement écailleuse. Sa couleur est le jaune de bronze, mélangé de rougeâtre, avec poussière noire grisâtre et éclat faiblement métallique.

Soluble dans les acides ; avec l'acide chlorhydrique, dégage de l'hydrogène sulfuré en laissant un résidu de soufre. Dans le tube ouvert, émet de l'acide sulfureux. Sur le charbon, donne une masse noire magnétique, souvent cobaltifère et nickélifère. Accompagne la cordiérite dans les roches archéennes de Bavière ; assez fréquente dans les filons ; trouvée en divers points des Pyrénées, enfin dans certaines météorites. Parfois pseudomorphosée en marcasite, pyrite ou galène,

Etym. : πυῤῥοτης, rougeâtre.

Pyrite. FeS^2. — P. S. = 4,83 à 5,2. — D. = 6 à 6,5. — S. cubique, avec polyèdre particulaire hémiaxe centré.

Combinaisons : p ; pa^1 (fig. 544) ; $\frac{1}{2}b^2$ (fig. 545) ; p, $\frac{1}{2}b^2$ (fig. 546) ; pa^1, $\frac{1}{2}b^2$

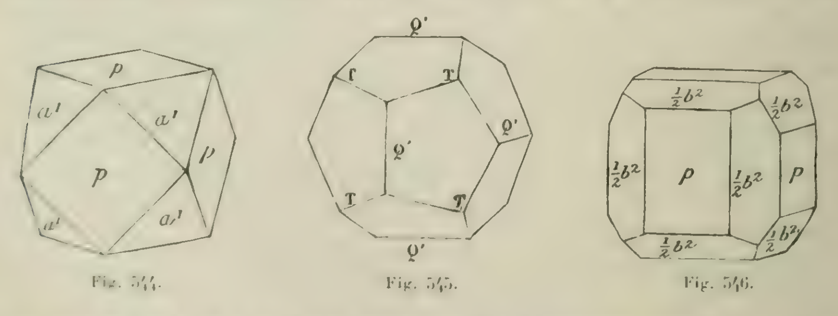


Fig. 544. Fig. 545. Fig. 546.

(fig. 547) ; a^1, $\frac{1}{2}b^2$ (fig. 548) ; $\frac{1}{2}b^2$, a^1, $\frac{1}{2}\{b^1b^1/_2b^1/_3\}$ (fig. 549) ; $\frac{1}{2}b^2$, $\frac{1}{2}\{b^1b^1/_2b^1/_4\}$ (fig. 550), ce dernier hexoctaèdre faisant partie de deux zones pb^2, savoir

[001 : 210] et [100 : 021] : p, $\frac{1}{2}\{b^1 b^1/_2 b^1/_3\}$ (fig. 551) ; pa^1, $\frac{1}{2}x$ (fig. 552) avec $x = \{b^1 b^1/_2 b^1/_3\}$ pa^1a^2, $\frac{1}{2}\{b^1 b^1/_2 b^1/_4\}$; $\frac{1}{2}b^2$, $\frac{1}{2}\{b^1 b^1/_2 b^1/_4\}$ (fig. 553).

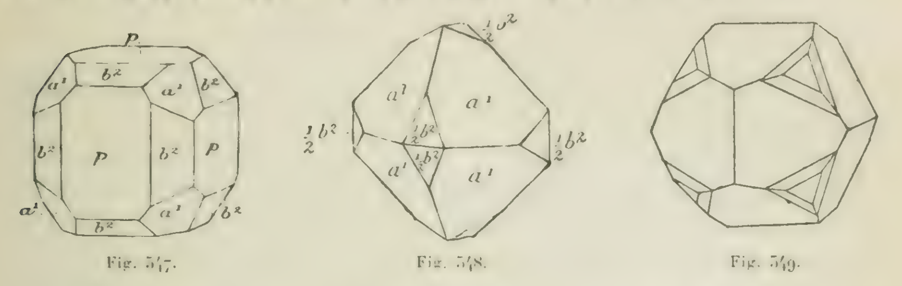


Fig. 547. Fig. 548. Fig. 549.

La figure 554 représente la combinaison du dioplèdre habituel (4) avec le cube (1), l'octaèdre (2) et le dodécaèdre pentagonal (3).

Angles : $pb^2 = 153°26'$; $a^1b^1 = 140°16'$; $a^1\{b^1 b^1/_2 b^1/_3\} = 157°47'$.

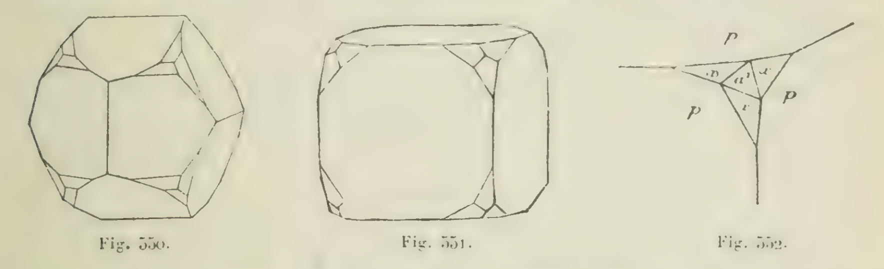


Fig. 550. Fig. 551. Fig. 552.

On connaît 25 dodécaèdres pentagonaux différents dans la pyrite et cette forme est assez caractéristique de l'espèce pour être souvent désignée sous le nom de *pyritoèdre* : on compte en outre 9 trapézoèdres, 4 trioctaèdres et

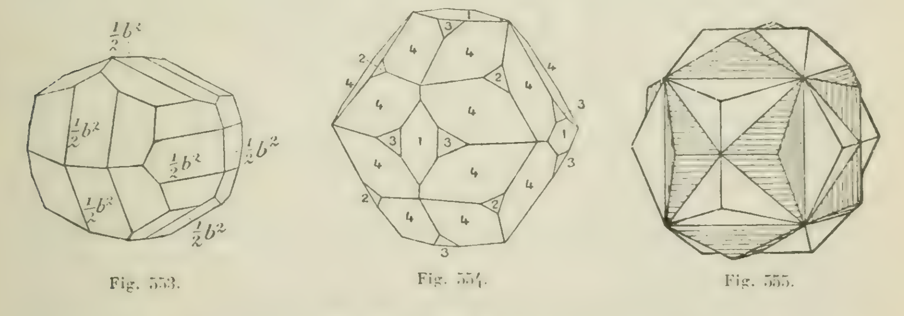


Fig. 553. Fig. 554. Fig. 555.

28 diploèdres. Les cristaux les plus riches en combinaisons sont ceux de l'île d'Elbe et de Traverselle. Dans cette dernière localité, il n'est pas rare de rencontrer, au milieu d'un calcaire saccharoïde, des cristaux très réguliers, à 98 facettes, constitués par les formes suivantes :

$$p,\ a^1,\ \tfrac{1}{2}b^2,\ \tfrac{1}{2}\{b^1 b^1/_2 b^1/_3\},\ \tfrac{1}{2}\{b^1 b^1/_2 b^1/_4\},\ \tfrac{1}{2}\{b^1 b^1/_3 b^1/_5\},$$

ces deux dernières formes étant seulement subordonnées.

Faces p souvent striées, chaque couple de faces portant des stries parallèles à l'une des trois directions d'arêtes du cube, de telle sorte que les stries d'une face sont perpendiculaires à la fois sur celles des quatre faces adjacentes (pyrite *triglyphe*). Clivages p et a^1, à peine sensibles.

Macles fréquentes, notamment la macle de la *croix de fer* (fig. 254), résultat d'une hémitropie moléculaire.

Cristaux généralement fort beaux, d'un vif éclat métallique, d'un jaune de laiton (d'où le nom de *pyrite jaune*), d'un poli assez parfait pour servir de miroirs et aussi en masses compactes, concrétionnées, etc. Cassure conchoïdale ou inégale. Fragile ; poussière noir verdâtre ou grisâtre ; fait feu au briquet.

Thermoélectrique ; certains cristaux sont négatifs, d'autres positifs, et parfois des parties positives et négatives alternent sur un même cristal. Très faiblement paramagnétique.

La composition de la pyrite pure comporte 46,67. Fe et 53,33. S ; mais généralement on trouve un peu de nickel, de cobalt, de cuivre, d'étain, d'arsenic, avec des traces d'or et d'argent.

Ch. Dans le tube fermé, donne un sublimé de soufre et un résidu magnétique. Sur le charbon, brûle avec flamme bleue en laissant un sulfure ferreux mélangé d'oxyde. Inattaquable par l'acide chlorhydrique ; attaquée par l'acide azotique avec dépôt de soufre.

La Pyrite de fer est extrêmement répandue, aussi bien dans les filons que dans les roches éruptives ou les terrains sédimentaires, où elle résulte souvent de la réduction des sulfates.

Opaque en plaques minces, la pyrite se distingue des autres minerais offrant la même propriété en ce que, si l'on fait réfléchir la lumière à la préparation, les parties correspondantes prennent une couleur jaune et un vif éclat métallique.

Étym. : πυρίτης, mot grec par lequel les anciens désignaient à la fois le silex pyromaque, la pyrite de fer et la pyrite de cuivre.

Marcasite. FeS^2. — P. S. = 4,6 à 4,8. — D. = 6 à 6,5. — S. rhombique : R. A. = 0,766 : 1 : 1,234. $mm = 105°5'$; $a^1a^1 = 63°40'$ sur p ; $b^1/_2 b^1/_2 = 113°53'$; $e^1e^1 = 101°58'$ sur g^1.

La Marcasite ou *Pyrite blanche* accuse, par son mode de cristallisation, le dimorphisme du bisulfure de fer. Elle représente d'ailleurs une forme de cette substance moins stable que la pyrite jaune ; car elle se transforme facilement à l'air en sulfate ferreux, propriété sur laquelle sont fondées des industries importantes, relatives à la fabrication du vitriol vert et de l'alun.

Combinaisons : me^1e^3 (fig. 556) ; $ma^1e^5/_4$ (fig. 557) ; $mpa^1c^1e^3b^1/_2$, etc.

Clivages : m assez facile ; e^1 traces. Cassure inégale. Couleur jaune avec tendance au gris ou au verdâtre foncé.

La Marcasite présente plusieurs types distincts de cristallisation (1) :

(1) Lacroix, *Minéralogie de la France*, II, p. 643.

Le premier, auquel appartient la combinaison $mpa^1e^1b^1/_2$, est formé de cristaux peu allongés suivant l'axe vertical, et pas toujours faciles à distinguer d'un cristal de pyrite jaune pa^1b^1.

Dans le second, les cristaux sont formés des faces m et aplatis suivant p. Enfin, dans le troisième, il y a encore aplatissement suivant p, mais allongement suivant pg^1, et les faces de cette dernière zone apparaissent presque seules.

Les macles les plus fréquentes sont celles où les cristaux ont la face m pour face d'accolement. Avec les cristaux du deuxième type, cette macle, en se répétant plusieurs fois, donne des individus polysynthétiques et, si tous les angles rentrants sont tournés du même côté, il en résulte la *macle en crête de coq*. Avec les cristaux du troisième type, l'accolement suivant m donne la *macle de la Sperkise* ou *Speerkies*. Celle-ci

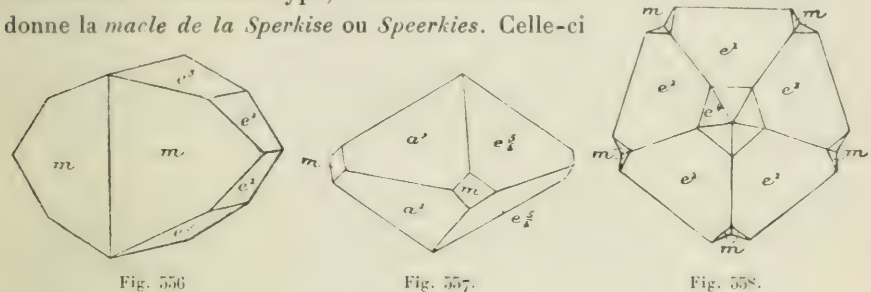


Fig. 556 Fig. 557. Fig. 558.

groupe souvent cinq individus aplatis (fig. 558), et quelquefois les faces m s'atrophient au point qu'on ne voit plus d'angles rentrants.

Très fréquemment la marcasite se présente en boules rayonnées, dont la surface est hérissée par les pointements octaédriques aigus des cristaux, d'ordinaire transformés (*épigénisés*) à la surface en limonite. Des boules de ce genre abondent dans la craie de la Champagne.

La marcasite peut être pseudomorphique de diverses substances et présente alors une texture compacte avec éclat semi-métallique (*Leberkies* ou *Hépatopyrite*). Souvent on observe des associations de pyrite jaune et de marcasite, où les cristaux de pyrite s'appliquent par une face p sur la face p de la marcasite, une autre face p du cube étant parallèle à m.

Ch. Insoluble dans l'acide chlorhydrique; attaquable par l'acide azotique. Mêmes réactions que la pyrite.

Quand on fait bouillir de la marcasite avec un excès de sel ferrique en dissolution, le pourcentage du sulfure oxydé n'est que de 18, tandis qu'il atteint 60,4 avec la pyrite. En nettoyant les deux minéraux avec de l'acide chlorhydrique, et examinant immédiatement leur surface sous un bon éclairement, on constate que la pyrite est d'un beau jaune, tandis que la marcasite est blanc d'étain ou grise sans trace de jaune. Cependant il n'y a pas de preuve que l'état de combinaison ou la valence du fer diffèrent dans les deux espèces (1).

(1) Stokes, *Bull. United States Geol. Survey*, n° 186 (1901).

Étym. : Le nom de Marcasite est, paraît-il, d'origine arabe et s'appliquait autrefois aussi à la pyrite jaune.

ARSÉNIURES, ARSÉNIOSULFURES

Löllingite. $FeAs^2$. — P. S. = 6,12 à 8,7. — D. = 5 à 5,5. = S. rhombique : R. A. = 0,669 : 1 : 1,233. *mm* = 112°27′ ; e^3e^3 = 133°19′ sur *p*.

Clivage *p* : cassure inégale ; couleur blanc d'argent, tirant sur le gris d'acier ; poussière gris noirâtre. Difficilement fusible en globule non magnétique, donne dans le tube un sublimé noir d'arsenic. Se trouve dans la serpentine et avec le fer spathique.

Étym. : Lölling en Carinthie.

La **Leucopyrite** est voisine de l'espèce précédente (*mm* = 122°26′), mais contient une proportion différente d'arsenic, exprimée par la formule Fe^2As^3 ou Fe^3As^4.

Étym. : λευκός, blanc.

Mispickel. FeAsS. — P. S. = 5,2 à 6. — D. = 5,5 à 6. — S. rhombique : R. A. = 0,677 : 1 : 1,198 ; *mm* = 111°45′ (1) ; e^1e^1 = 100°17′ sur g^1 ; e^3e^3 = 136°28′ sur *p*.

Combinaisons : me^1 ; me^3 (fig. 559) ; me^4a^1 ; $pma^1e^2e^1$, etc. Clivage *m* distinct. Le Mispickel ou *fer arsenical* (*Arsénopyrite*) se présente quelquefois, à la

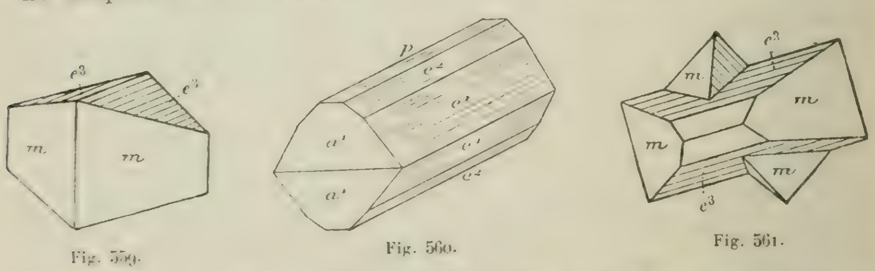


Fig. 559. Fig. 560. Fig. 561.

Villeder, en cristaux d'apparence prismatique et à section un peu arrondie (fig. 560), par suite de la coexistence du biseau a^1 avec les faces de la zone pg^1, c'est-à-dire *p*, e^2, e^1, striées suivant l'axe de la zone. D'autres fois, deux cristaux me^3 se pénètrent, ayant les faces e^3 striées parallèlement à leur intersection mutuelle (fig. 561).

Les cristaux sont souvent d'un beau blanc d'argent, quelquefois jaunâtres à la surface, avec un vif éclat métallique. La poussière est gris noirâtre et l'espèce fait feu au briquet en émettant une odeur arsenicale.

Ch. Dans le tube fermé, donne d'abord un sublimé rouge brun de sulfure

(1) L'angle paraît varier avec la quantité de soufre.

d'arsenic, puis un anneau d'arsenic métallique. Dans le tube ouvert, sublimé blanc d'acide arsénieux et odeur sulfureuse. Sur le charbon, exhale des fumées arsenicales et laisse un globule magnétique, parfois cobaltifère.

Se rencontre associé aux minerais d'étain et d'argent; fréquemment dans la serpentine.

Étym. : L'espèce était qualifiée de *Mistpuckel* dès le temps d'Agricola.

La variété *Danaïte* est cobaltifère et établit le passage du mispickel au glaucodote. On y observe $ma^1e^3e^1e^{1/3}b^{1/2}b^{1/6}a^2y$ avec $y = b^1b^{1/3}h^{1/2}$.

MINERAIS OXYDÉS

OXYDES

Magnétite ou **Fer oxydulé**. Fe^3O^4. — P. S. = 4,9 à 5,2. — D. = 5,5 à 6,5. — S. cubique.

Combinaisons : a^1; b^1; a^1b^1 (fig. 562); b^1a^3 (fig. 563); $a^1b^1a^3a^{1/2}$, etc. Les faces du cube sont très rares. Les faces b sont striées suivant les longues diagonales des rhombes. Clivage a^1 difficile; macles suivant a^1 conformément à la loi des spinelles, dont la Magnétite fait essentiellement partie, sa formule pouvant s'écrire FeO. Fe^2O^3. Noir de fer; poussière noire. Éclat variable. Opaque, même en lames minces. Agit toujours sur l'aiguille aimantée. Par exception, la Magnétite peut être *magnétipolaire*; elle forme alors la *pierre d'aimant* ou *aimant naturel*. Dans ce cas elle attire la limaille de fer, qui s'amoncelle autour des deux pôles. Cette propriété se rencontre surtout sur les masses compactes, parfois aussi sur des cristaux. Mais on n'observe aucun rapport entre la position des pôles magnétiques et les éléments de la forme cristalline.

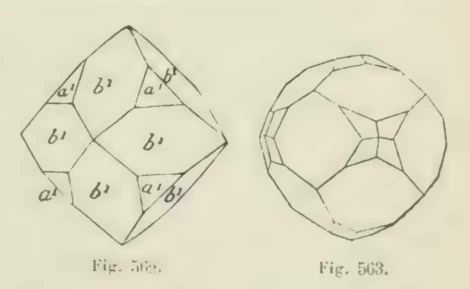


Fig. 562. Fig. 563.

La Magnétite forme, à la surface du globe, des gisements qui constituent de véritables montagnes. Elle est abondamment répandue parmi les roches basiques, notamment les basaltes, et ses octaèdres bien formés sont fréquents dans les chloritoschites. Dans les plaques minces, on la reconnaît à son opacité complète et à ses formes généralement carrées (fig. 564). Éclairée par réflexion, la partie correspondante de la préparation est d'un bleu noirâtre, avec éclat métallique.

Fig. 564.

Ch. Très difficilement fusible; perd la vertu magnétique dans la flamme

oxydante. Réactions du fer. Lentement soluble dans l'acide chlorhydrique concentré.

Étym. : *Magnes*, aimant.

A la Magnétite se relie la **Magnéferrite** (*Magnoferrite, Magnésioferrite*), spinelle ferro-magnésien, $MgFe^2O^4$, en octaèdres noirs, avec poussière noire, fortement magnétiques, observés dans les fumerolles du Vésuve par Scacchi. — P. S. = 4,54 à 4,56. — D. = 6 à 6,5.

Oligiste. Fe^2O^3. — P. S. = 4,9 à 5,3. — D. = 5,5 à 6,5. — S. rhomboédrique : R. A. = 1 : 1,359, $pp = 86°10'$ (isomorphe avec l'alumine).

Combinaisons : a^1p en tablettes hexagonales (fig. 565) ; $a^1pe^1/_2$, avec développement égal, donnant une double pyramide tronquée (fig. 566) ; $a^1pe^1/_2$, avec développement inégal des deux rhomboèdres (fig. 567) ; combinaison des rhomboèdres p et a^2 avec l'isocéloèdre $e_3 = \{b^1d^1d^1/_3\}$ (fig. 568), où $pe_3 = 154°$. e_3 jouit de la propriété qu'une face p forme zone avec deux faces adjacentes de cet isocéloèdre ; tablettes a^1pd^1 ; on trouve encore le prisme e^2 et les faces b^1, a^4, $\{b^1/_3d^1d^1/_2\}$; à Framont, tablettes a^1e_3p ; en Oisans, tablettes $a^1d^1e^2$, etc. Angles : $pa^1 = 122°30'$; $a^2a^1 = 158°35'$. Clivages p et a^1, souvent peu nets. Faces a^1 habituellement lisses, devenant courbes par oscillation avec a^2 ; faces p striées. Faces a^2 souvent striées et courbes, par combinaison multiple de a^2 avec $a^{11}/_2$, c'est-à-dire (11 . 2 . 2) ou $(30\bar{3}5)$. Macles par hémitropie normale à p ou à a^1, quelquefois à e^2.

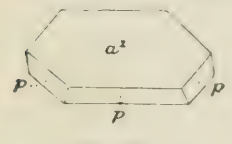


Fig. 565.

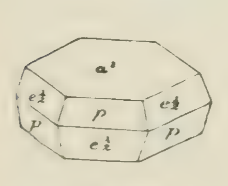


Fig. 566.

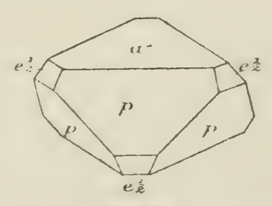


Fig. 567.

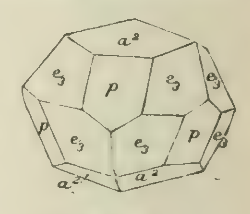


Fig. 568.

Les cristaux sont d'un gris métallique foncé, éclatants, souvent irisés à la surface ; opaques sauf en lames minces, où ils présentent une couleur rouge-sang (d'où le nom d'*Hématite*). Leur cassure est conchoïdale. Il y a des variétés en fines écailles, à reflets violacés, qui demeurent adhérentes aux doigts comme les paillettes de mica (*Oligiste écailleux* ou *micacé*). Des lames très minces, éclatantes, parfaitement planes (*fer spéculaire*), s'observent dans les fissures de certaines roches volcaniques.

Les variétés compactes (*Hématite rouge*) sont grises ou rouges ; les variétés fibreuses sont noires ou rouges ; enfin les variétés terreuses sont d'un rouge

plus ou moins vif (*Ocre rouge*, *Sanguine*). Poussière rouge, distinguant l'oligiste de la magnétite et de la limonite.

Opt. Uniaxe négatif; $n_e = 2,797$; $n_n = 3,042$; polychroïque.

Ch. Infusible. Réact. 48, 64. Sur le charbon, au feu réducteur, devient attirable à l'aimant. Lentement soluble dans l'acide chlorhydrique.

L'oligiste existe en filons, en massifs et aussi en imprégnations, disséminé dans certaines roches quartzeuses, telles que l'Itabirite du Brésil.

A l'état d'oligiste micacé (*Eisenglimmer*) en minces paillettes hexagonales, l'espèce forme la matière colorante des phyllades rouges. C'est la même variété qui colore en rouge l'Aventurine, la Carnallite, la Topaze, la Heulandite de Fassa, l'Apophyllite de la Seisser Alp. Elle est très répandue parmi les micas des pegmatites, où c'est elle qui, combinée avec la tourmaline, engendre le phénomène de l'astérisme.

Étym. : ὀλίγος, peu, parce que l'espèce contient moins de fer que la magnétite (Haüy).

La **Martite** est un sesquioxyde de fer Fe^2O^3, qui affecte les formes de la magnétite, et notamment l'octaèdre régulier. Sa poussière est rouge. P. S. = 4,8 à 5,2. — D. = 6 à 7. Elle est d'un noir de fer et n'agit en général que très faiblement sur l'aimant. Les uns la considèrent comme une pseudomorphose de magnétite en oligiste. D'autres admettent le dimorphisme de l'oxyde ferrique, ou encore des groupements réguliers d'hématite et de magnétite ou magnésioferrite.

Certaines variétés d'oligiste sont titanifères et préparent la transition à une espèce isomorphe, qui est l'**Ilménite** ou **Fer titané**, $(Ti, Fe)^2O^3$ (1). Cette espèce, qui peut renfermer des parties égales des deux oxydes ferrique ou titanique, cristallise en rhomboèdres de 85°40′ à 86°10′, avec polyèdre hémiaxe centré, l'hémiédrie pouvant être masquée par la coexistence des formes conjuguées. Tantôt on observe une combinaison $pa^1e^1e_3$ (fig. 569), très analogue à celle de l'oligiste, souvent aplatie en lames hexagonales; tantôt, comme dans la variété *Crichtonite* de l'Oisans, c'est un rhomboèdre aigu $e^3/_2$, de 46°30′, terminé par la base a^1; noir de fer, éclat demi-métallique. Très faiblement magnétique. Infusible à la flamme oxydante. Réact. 48, 64, 69, 120. — P. S. = 4,6 à 5,3. — D. = 5 à 6. Poussière noire, quelquefois brune ou brun rouge.

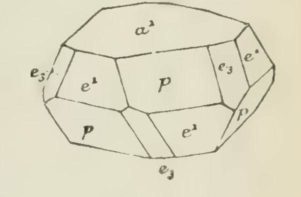


Fig. 569.

L'Ilménite est fréquente dans les schistes cristallins et les roches basaltiques; on la distingue, dans les plaques minces, à ce que ses grains sont entourés d'un enduit grisâtre ou jaunâtre à bords ombrés. Ce produit, qui a reçu le

(1) Quelques auteurs admettent la formule $FeO.TiO^2$.

nom de *Leucoxène*, est aujourd'hui considéré comme identique avec le sphène.

Étym. : Du lac Ilmen en Russie.

Gœthite. $H^2Fe^2O^4$. — P. S. = 3,8 à 4,4. — D. = 5 à 5,5. — S. rhombique ; R. A. = 0,918 : 1 : 0,607 ; mm = 94°52′ ; $b^{1/2}b^{1/2}$ = 121°5′ lat. = 126°18′ en avant.

Combinaisons : $mh^3g^1b^{1/2}e^1$, $g^1h^1a^{1/4}e^1$, souvent avec prédominance de g^1, donnant naissance à des cristaux tabulaires. Clivage parfait g^1. Également en prismes courts et aiguilles allongées, en petites lamelles (*Rubinglimmer*), en masses écailleuses ou fibreuses (*Lépidocrocite*) (1), en croûtes mamelonnées, d'un noir de poix (*Eisenpecherz*), etc.

Jaunâtre ; rougeâtre ; brun noirâtre ; poussière jaune. Éclat imparfaitement adamantin. Rouge sang par transmission. A. O. dans p. Biss. négative, normale à g^1. Dispersion énorme. 2V = 26° (bleu et vert) ; $\rho < v$. Indice : 1,8. Réact. 23, 43, 48, 64. Soluble dans l'acide sulfurique. Accompagne les autres oxydes de fer, notamment à Siegen et en Cournouailles.

Étym. : Dédiée à Gœthe.

Limonite, $H^6Fe^4O^9$. — La limonite ou *fer oxydé hydraté*, appelée aussi *Hématite brune*, est une substance le plus souvent amorphe, de P. S. = 3,6 à 4 et D. = 5 à 5,5. A cette espèce appartiennent les minerais de fer les plus répandus. Sa poussière est d'un jaune brun, ce qui la distingue de l'oligiste. Soluble dans les acides, elle donne les réactions 23, 48 et 64. La limonite fibreuse ou hématite brune proprement dite forme des rognons concrétionnés, des masses stalactitiques ou mamelonnées à surface noire, luisante, quelquefois très nettement irisée, ou enfin des masses compactes, d'un brun foncé, à cassure unie. Certaines limonites fibreuses ou concrétionnées laissent reconnaître, selon M. Lacroix, une cristallisation orthorhombique, avec clivage h^1. A. O. dans h^1, Biss. négative, normale à g^1. $\rho > v$. Polychroïsme intense.

La limonite en grains ou *pisolithique* est en globules sphéroïdaux, formés de couches concentriques, et souvent vides à l'intérieur. Le *minerai oolithique* est en grains plus petits, ordinairement soudés, et formant des couches dans les terrains stratifiés. La *limonite terreuse*, tendre et tachant les doigts, est d'un brun passant au jaune. Les variétés les plus argileuses constituent les *ocres jaunes*, où la proportion d'oxyde ferrique descend à 12 %. Le *minerai des marais*, souvent vitreux ou résineux, est riche en phosphore. Le *fer géodique* est un grès ferrugineux à cavités irrégulières et l'*œtite* ou pierre d'aigle est une limonite en nodules creux, dont l'intérieur contient des noyaux mobiles.

Les limonites les plus pures, comme celles de Viedessos (Ariège), contiennent 82 % d'oxyde ferrique avec 2 % d'oxyde manganique, 14 % d'eau et 1 % de silice. Le minerai en grains renferme de 37 à 69 % d'oxyde ferrique.

(1) M. Lacroix distingue la Lépidocrocite de la Gœthite à cause de ses propriétés optiques (A. O. dans h^1 ; polychroïsme intense).

La limonite se transforme en hématite rouge par perte d'eau, et sa poussière acquiert alors une couleur rouge intense, même avant que la transformation soit complète.

OXYSELS

CARBONATE, SULFATES.

Sidérose. $FeCO^3$. — P. S. = 3,83 à 3,88. — D. = 3,5 à 4,5. — S. rhomboédrique; R. A. = 1 : 0,818. $pp = 107°$; angle plan du sommet ; 103°4′30″.

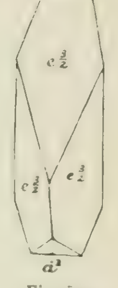


Fig. 570.

Combinaisons p; e^1; e^3; $e^3/_2$; $a^1e^3/_2$ (fig. 570), avec $e^3/_2e^3/_2 =$ 64°10′; pd^2; pd^2d^1; $e^2a^1pb^1$, etc. Faces p et b^1 souvent courbes; faces b^1 striées suivant pb^1; $e^3/_2$ souvent arrondi. Macles avec assemblage suivant b^1. Lames minces hémitropes fréquentes, comme pour la calcite. Clivage p parfait.

Double réfraction énergique, négative; éclat vitreux. Blonde ou brun jaunâtre, devenant brune, noire ou rouge à l'air. Poussière blanc jaunâtre. Fragile.

Ch. Décrépite et devient magnétique. Réact. 48 et 64. En poudre et à chaud, facilement soluble dans les acides; effervescence lente à froid.

En cristaux, souvent lenticulaires, groupés, dans divers filons métallifères. En masses spathiques, d'un blanc clair (*fer spathique*).

La *Sphérosidérite* est une variété compacte de sidérose, en nodules ou concrétions fibreuses. Le *fer carbonaté lithoïde*, fréquent dans le terrain houiller, est une variété argileuse en rognons aplatis ou en couches continues (*black-band*).

La sidérose (1) contient souvent de la magnésie et du manganèse. Une variété dite *Oligonite* renferme 25 % de manganèse.

Souvent les cristaux de sidérose, en gardant leurs formes rhomboédriques, ont été transformés en limonite.

Étym. : σίδηρος, fer.

Les sulfates de fer sont assez nombreux. Le plus important est la **Mélantérie** ou *Couperose verte*, $H^{14}FeSO^{11}$, en cristaux limpides, vert pâle, d'apparence rhomboédrique, mais dérivés d'un prisme monoclinique (R. A. = 1,183 : 1 : 1,543; $ph^1 = 104°15′$; $mm = 82°22′$; $pm = 99°20′$ et 80°40′; $d^1/_2d^1/_2 = 101°27′$ et offrant la combinaison $m\,p\,o^1\,a^1\,e^1\,d^1/_2$. — P. S. = 1,83 à 2. — D. = 2. La Mélantérie s'altère à l'air et devient brun de rouille. Clivages : p parfait; m moins parfait. Signe opt. positif. A. O dans g^1. $2V = 86°,2$. $n_m = 1,470$ (D).

Etym. : Nom déjà employé par Dioscoride et reproduit par Agricola.

(1) Divers auteurs écrivent *le* Sidérose : nous croyons devoir conserver à ce nom le genre que son auteur, Beudant, lui a donné.

Nous citerons encore la **Copiapite** (de Copiapo, Chili), $H^{24}Fe^{4}S^{5}O^{33}$, en écailles hexagonales d'un jaune citron, paraissant dériver d'un prisme rhombique pseudo-hexagonal; l'**Apatélite**, $H^{5}Fe^{6}S^{5}O^{26}$, en rognons sphéroïdaux jaune-clair, disséminés dans l'argile de Meudon et d'Auteuil; la **Fibroferrite**, $H^{54}Fe^{6}S^{5}O^{51}$, en fibres déliées jaunes; le **Botryogène** ou *fer sulfaté rouge*, en masses amorphes ou en cristaux monocliniques d'un rouge hyacinthe ($mm = 119°56'$), contenant 36 à 37 % d'acide sulfurique et 28 à 31 % d'eau; la **Tauriscite** qui, avec la composition de la Mélantérie, est rhombique et isomorphe avec l'Epsomite; enfin la **Diadochite**, en masses stalactitiques jaunes, avec 15 % d'acide phosphorique, 15 d'acide sulfurique, 40 de protoxyde de fer et 30 d'eau.

PHOSPHATES, ARSÉNIATES, SILICATES

Vivianite. $H^{16}Fe^{3}P^{2}O^{16}$. — P. S. = 2,53 à 2,68. — D. = 1,5 à 2. — S. monoclinique : R. A. = 0,7497 : 1 : 0,7015 ; $mm = 108°2'$; $ph^1 = 104°26'$.

Cristaux prismatiques allongés $mg^1h^2h^1b^1/_2d^1$, avec p, b^1, e^2, o^1 $d^1/_2$, a^1 ; bleus, transparents, de poussière blanche ou bleuâtre, passant rapidement au bleu indigo. Clivage g^1 parfait. Signe opt. positif. A. O. dans un plan normal à g^1 ; $2V = 73°,2$. $\rho < v$. $n_m = 1,592$. Soluble dans l'acide chlorhydrique. Donne de l'eau, blanchit et s'exfolie au chalumeau, avec réactions 15, 48, 64.

Étym. : Dédiée à M. Vivian.

La **Dufrénite**, $H^{6}Fe^{4}P^{2}O^{14}$, est un phosphate hydraté, en masses concrétionnées ou fibreuses, d'un vert passant par altération au jaune et au brun. P. S. = 3,2 à 3,4. — D. = 3,5 à 4. On la rapporte à un prisme rhombique de 97°44' (R. A. = 0,873 : 1 : 0,426) avec clivage h^1.

Étym. : Dédiée à Dufrénoy.

Le *Cacoxène*, en cristaux aciculaires jaunâtres, est une variété très hydratée de Dufrénite.

Quant aux phosphates de fer qui contiennent en même temps du manganèse, il en existe plusieurs, dont deux, la **Triplite** et la **Triphyline**, ont déjà été mentionnés avec les minerais de manganèse. Il ne nous reste à citer ici que : la **Childrénite**, $H^{8}(Fe,Mn)^{2}Al^{2}P^{2}O^{14}$, substance jaunâtre rhombique (R. A = 0,778 : 1 : 0,526. $mm = 104°14'$; $b^1/_2b^1/_2$ [en avant] = 118°14'), avec clivage p imparfait. — P. S. = 3,18 à 3,24. — D. = 4,5 à 5. On y trouve 31 %. FeO, contre 9. MnO, avec 17. H^2O, 29. P^2O^5 et 14,4. Al^2O^3. Signe opt. négatif. A. O. dans h^1. Biss. normale à g^1.

Scorodite. $H^{8}Fe^{2}As^{2}O^{12}$. — P. S. = 3,11 à 3,18. — D. = 3,5 à 4. — S. rhombique ; R. A. = 0,867 : 1 : 0,958. $mm = 98°6'$; $b^1/_2b^1/_2 = 114°30'$ (avant). = 102°52' lat. = 111°16' par-dessus m.

Combinaisons : h^1 g^1 $b^1/_2$ (fig. 571) ; h^1 g^1 g^3 $b^1/_2$; etc. Clivage g^3 imparfait

($g^3g^3 = 50°59'$). Cristaux d'un vert pâle, bleuâtre, à éclat vitreux assez vif ; poussière blanche. Signe opt. positif. A. O. dans h^1. Biss. normale à p ; $2E = 129°32'$ (D) ; $\rho > v$.

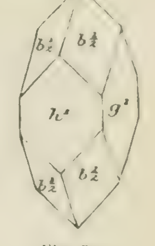


Fig. 571.

Ch. Réact. 23 ; facilement fusible en scorie magnétique ; Réact. 32, 43. Soluble dans l'acide chlorhydrique ; attaquable par la potasse.

Étym. : σκόροδον, ail, à cause de l'odeur au chalumeau.

Il existe d'autres arséniates de fer hydratés, parmi lesquels nous mentionnerons :

Pharmacosidérite. $H^{30}Fe^8As^6O^{42}$. — P. S. = 2,9 à 3. — D. = 2,5. — Cubique ou plutôt pseudo-cubique. En jolis cristaux d'un vert foncé, simulant la forme cubique avec hémiédrie tétraédrique. — **Sidérétine**, $H^{24}Fe^4As^2O^{23}$, en masses réniformes jaunes et rouges. — **Arséniosidérite**, $H^{18}Fe^8Ca^6As^6O^{42}$, en masses concrétionnées aux fibres d'un jaune d'or, uniaxes et négatives, avec 10 à 15 °/₀ de chaux.

La **Chamosite** ou **Chamoisite**, de la montagne de Chamoson en Valais, est un excellent minerai de fer, composé de 14,3. SiO^2 ; 7,8. Al^2O^3 ; 60,5. FeO, et 17,4. H^2O. — P. S. = 3 à 3,4. — D. = 3. Amorphe, de couleur gris verdâtre ou noirâtre, aisément fusible, elle est facilement attirable à l'aimant et fait gelée avec l'acide chlorhydrique.

La **Berthiérine** d'Hayange est plus riche en fer (74,7 °/₀) et contient moins d'eau. Gris-bleuâtre, ou noir verdâtre, magnétique et difficilement fusible, elle fait aussi gelée avec l'acide chlorhydrique. Dédiée à Berthier.

Plusieurs auteurs rangent ces deux dernières espèces parmi les *Leptochlorites*.

MINERAIS HALOIDES

CHLORURES

La **Molysite** est un sesquichlorure de fer, Fe^2Cl^3, qui se dégage de la lave du Vésuve, en formant des incrustations ou taches brun rouge ou jaunes.

Etym. : μόλυσις, tache.

La combinaison de ce chlorure avec ceux de potassium et d'ammonium donne la **Kremersite** du Vésuve. $(KCl + AmCl)^2 + Fe^2Cl^6 + 3H^2O$, en octaèdres réguliers d'un rouge de rubis.

Étym. : Dédiée à M. Kremers.

MINERAIS DE COBALT

MINERAIS NON OXYDÉS

On connaît, sous le nom de **Linnéite** (dédiée à Linné), un sulfure de cobalt, très chargé de nickel, $(Co, Ni)^3S^4$, parfois ferrifère ou cuprifère et cristallisant

dans le système cubique, sous les formes p et a^1, avec clivage p imparfait et macles suivant a^1. Les cristaux sont d'un gris d'acier, souvent rougeâtre et d'un vif éclat métallique. P. S. = 4,8 à 5. — D. = 5,5. — Poussière gris-noir. Soluble dans l'acide azotique. Réact. 24,30. Avec les flux, réactions du fer, du cobalt et du nickel. L'analyse donne de 11 à 40. Co; 0 à 42. Ni.

Smaltine. $CoAs^2$ ou $(Co,Fe)As^2$. = P. S. = 6.1 à 6,6. — D. = 5,5 à 6. — S. cubique.

Combinaisons : p; pa^1; $pa^1\ b^1\ a^2$, etc. Faces p et a^1 souvent courbes et comme gercées.

La Smaltine ou *Cobalt arsenical* (*Speiskobalt*) se montre en cristaux ou en masses cristallines compactes, réticulées (*Cobalt tricoté*), gris d'acier ou blanc d'étain. Poussière gris noirâtre; cassure inégale; pas de clivage bien distinct. Thermoélectrique.

Ch. : Dans le tube bouché, donne, par une forte calcination, surtout avec du cyanure de potassium, un sublimé d'arsenic métallique, tandis que, dans le tube ouvert, on obtient un sublimé blanc d'acide arsénieux. Sur le charbon, donne un globule gris magnétique, souvent chargé de nickel et de fer, avec fumées d'arsenic. Attaquable à l'acide azotique avec résidu d'acide arsénieux; la dissolution, rose quand il y a peu de nickel et de fer, est jaune quand ces deux métaux existent en proportion notable. Réact. 51.

Étym. : *Smalt* ou bleu de cobalt, à la fabrication duquel la smaltine est employée.

La Smaltine, très ferrifère, devient rhombique et porte le nom de *Safflorite*. Les variétés nickélifères passent à la Chloanthite.

Cobaltine. CoAsS. — P. S. = 6,2 à 6,37. — D. = 5,5. — S. cubique, avec polyèdre hémiaxe centré, comme pour la pyrite.

Combinaisons : p, $\frac{1}{2}\ b^2$; pa^1, $\frac{1}{2}\ b^2$; a^1, $\frac{1}{2}\ b^2$, avec développement égal des deux formes, conduisant à un icosaèdre très voisin de l'icosaèdre régulier (fig. 572); $p\ \frac{1}{2}\ \{b^1\ b^1/_2 b^1/_3\}$; etc. Clivage p parfait. Faces p striées suivant les arêtes cubiques.

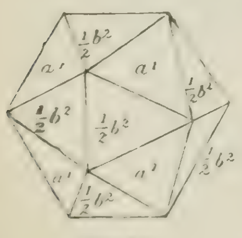


Fig. 572.

La Cobaltine ou *Cobalt gris* (*Kobaltglanz*) se présente en cristaux ou en masses compactes d'un vif éclat métallique, d'un blanc d'argent tirant sur le gris, avec reflets rougeâtres. Poussière gris-noirâtre. Fait feu au briquet. Thermoélectrique.

Ch. : Réact. 30, 37, 51. Reste à peu près intacte dans le tube bouché. Attaquable à chaud par l'acide nitrique en donnant une solution rose et un dépôt d'acide arsénieux.

La Cobaltine contient généralement un peu de fer. Quand la proportion de

ce métal devient plus considérable, on passe à une autre espèce, le **Glaucodote**, (Co,Fe)SAs, rhombique et isomorphe avec le mispickel (R. A. = 0,694 : 1 : 1,192; mm = 110°28'). Le glaucodote est d'un blanc d'étain, un peu gris, avec poussière noire et clivage p. — P. S. = 6. — D. = 5. Avec le borax, il donne successivement les réactions du fer et du colbat.

MINERAIS OXYDÉS

On connaît, dans la nature, le cobalt oxydé, mélangé au manganèse, sous la forme d'**Asbolane** (1) ou *cobalt oxydé noir*; cette espèce contient 30 à 40 de MnO contre 20 à 32. CoO et 21 à 23. H^2O.

Étym. : ἀσβόλη, suie, parce que le minéral tache comme la suie.

On a découvert en 1872 un autre hydroxyde de cobalt, exempt de manganèse, répondant à la formule $H^{12}Co^5O^{13}$. Ce minéral, nommé **Hétérogénite**, est noir avec P. S. = 3,44 et D. = 3.

La **Biebérite**, $H^{14}CoSO^{11}$, est un sulfate hydraté de cobalt, monoclinique (mm = 82°20'), habituellement en stalactites ou en enduits d'un rouge de chair ou rose pâle, de saveur styptique et amère. Réact. 51.

Étym. : Localité de Bieber (Hesse).

Érythrine. $H^{16}Co^3As^2O^{16}$. — P. S. = 2,95. — D. = 1,5 à 2,5. — S. monoclinique : R. A. = 0,75 : 1 : 0,70; mm = 110°; ph^1 = 105°; a^1h^1 = 124°51'; $b^1/_2b^1/_2$ = 118°24' (2).

Le *cobalt arséniaté*, nommé Érythrine à cause de sa couleur d'un rouge fleur de pêcher, parfois très vif, forme des cristaux ou des fibres cristallines $g^1h^1a^1$, de poussière rose clair, avec clivage g^1 parfait. Signe opt. négatif. Biss. normale à g^1. 2H = 103° (D). Sectile.

Dans le tube fermé, l'Érythrine donne de l'eau et devient bleue ou verte; à une plus haute température, elle noircit en perdant de l'acide arsénieux. Sur le charbon, elle donne un arséniure qui présente la réaction 51. Soluble en rose dans l'acide chlorhydrique.

MINERAIS DE NICKEL

MINERAIS NON OXYDÉS

Millérite. NiS. — P. S. = 5,2 à 5,6. — D. = 3 à 3,5. — S. rhomboédrique : R. A. = 1 : 0,3295 (3); pp = 144°8'.

La Millérite, ordinairement mélangée de fer, de cuivre et de cobalt, est le

(1) Voir plus haut, p. 604. — (2) Ce choix de données a l'avantage de faire ressortir l'isomorphisme de l'Érythrine avec la Vivianite. — (3) Quelques auteurs admettent R. A. = 1 : 0,988, avec pp = 98°43', pour faire ressortir un peu mieux l'isomorphisme avec la Greenockite. Dans ce cas, notre rhomboèdre p devient $a^5/_2$.

plus souvent en cristaux capillaires (d'où les noms de *Haarkies* et *Trichopyrite*) d'un beau jaune d'or, tournant au bronze, parfois irisés, où dominent les prismes e^1 et d^1. Clivage p et b^1 parfaits.

Ch. Fusible en globule brillant, magnétique. Soluble en vert dans l'eau régale. Réact. 30.

Étym. : Dédiée à Miller.

Il existe encore d'autres sulfures où le nickel est associé à divers métaux. Nous citerons : la **Beyrichite**, $(Ni,Fe)^5S^7$, en prismes tordus d'un gris de plomb ; la **Pentlandite** ou *Nicopyrite*, Fe^2NiS^3, en masses d'un jaune de bronze à clivages octaédriques. P. S. = 4,6. — D. = 3,5 à 4 ; la **Grünauite**, où 22 à 40 % Ni sont associés à 10-14. Bi, 0-11. Co., 1-11. Cu, 1-7. Pb. 3-6. Fe. Cette dernière substance, cubique et d'un gris d'acier, se trouve à Grünau, en très petits cristaux octaédriques. P. S. = 5,13. — D. = 4,5.

Nickéline. NiAs. — P. S. = 7,4 à 7,72. — D. = 5 à 5,5. — S. hexagonal ; R. A. = 1 : 0,819 ; pb^1 = 136°35′.

La nickéline se présente le plus souvent en masses compactes d'un rouge de cuivre (d'où le nom de *Kupfernickel*), presque constamment associées à l'Annabergite ou Nickelocre.

Ch. Réact. 26, 36, 48, 50, 51. Soluble en liqueur verte dans l'acide azotique avec dépôt blanc d'acide arsénieux.

Chloanthite. $NiAs^2$. — P. S. = 6,4 à 6,9. — D. = 5,5. S. cubique.

Cette substance, d'abord confondue avec la smaltine, se présente en cristaux cubo-octaédriques avec clivage a^1 distinct, ou en masses d'un gris clair, souvent recouvertes d'un enduit vert d'arséniate. Elle est généralement cobaltifère et ferrifère.

Ch. Dans le tube fermé, donne un sublimé d'arsenic et devient rouge en passant à l'état de nickéline. Réactions du fer, du cobalt et du nickel. Soluble en jaune topaze ou verdâtre dans l'acide azotique.

Étym. : χλοανθής, verdoyant, à cause de l'enduit vert d'arséniate.

Disomose ou **Gersdorffite**. NiAsS. — P. S. = 6,1 à 6,3. — D. = 5,5. — S. cubique avec polyèdre hémiaxe centré.

Le Disomose est isomorphe avec la cobaltine ; cependant c'est la combinaison pa^1 qui domine, avec clivage p parfait. Blanc d'argent, gris d'acier, poussière noir-grisâtre.

Ch. Dans le tube fermé, décrépite et donne un sublimé de sulfure d'arsenic. Avec le borax, réactions successives du fer, du cobalt et du nickel. Soluble en vert dans l'acide azotique.

Etym. : δίς ὅμοιος, deux fois ressemblant, parce que ayant la formule et la forme de la cobaltine, le minéral peut aussi être regardé comme une Ullmannite où l'antimoine est remplacé par l'arsenic.

La **Breithauptite** ou *Nickel antimonial*, NiSb, forme de petites tables hexagonales d'un rouge de cuivre violacé, où les faces de la pyramide font avec la base un angle de 135°15', ce qui rend l'espèce isomorphe avec la nickéline (R. A. = 1 : 0,859). P. S. = 7,5. D. = 5 à 5,5 Réact. 33.

Étym. : Dédiée à Breithaupt.

Ullmannite. NiSbS. — P. S. = 6,2 à 6,5. D. = 5 à 5,5. — S. cubique avec quelques formes tétraédriques (1).

Formes : p ; a^1 ; b^1 ; $pb\frac{1}{2}b^2$; clivage p parfait. Gris bleu ou gris noir, parfois irisée.

Ch. Sur le charbon, fond avec bouillonnement en émettant des fumées d'antimoine. Réact. 50. Soluble en vert dans l'acide azotique avec résidu de soufre et d'acide antimonique.

Etym. : Dédiée à Ullmann.

MINERAIS OXYDÉS

Bunsénite. NiO. — P. S. = 6,4. — D. = 5,5. — S. cubique.

Petits octaèdres réguliers d'un beau vert, à éclat vitreux, translucides en lames minces.

Étym. : Dédiée à Bunsen.

La **Texasite** ou *Zaratite* est un hydrocarbonate de nickel, $H^{12}Ni^3CO^{11}$ (P. S. = 2,57 à 3,69. D. = 3 à 3,25), en incrustations ou masses mamelonnées d'un beau vert émeraude dans le fer chromé du Texas ainsi qu'au cap Ortegal. Infusible au chalumeau. Réact. 23, 50, 87.

La **Morenosite** est un sulfate hydraté de nickel, $H^{14}NiSO^{11}$, en cristaux aciculaires et efflorescences vertes sur les minerais du nickel. — P. S. = 2. — D. = 2 à 2,25. — S. rhombique. R. A. = 0,982 : 1 : 0.566; $mm = 91°4'$; clivage g^1. A. O. dans p. 2E = 65°.

L'**Annabergite** ou **Nickelocre** est un arséniate hydraté de nickel, $H^{16}Ni^3As^2O^{16}$, en masses cristallines fibreuses d'un beau vert, monocliniques, accompagnant souvent la nickéline, notamment à Annaberg (Saxe).

On connaît plusieurs hydrosilicates où le nickel est associé à la magnésie et à diverses autres bases. De ce nombre sont :

(1) Observées à Lölling, par M. de Zepharovich.

Genthite (32 à 35. SiO^2; 30,3. NiO; 3,5 à 14,5. MgO; 0 à 4. CaO; 17 à 19. H^2O), en masses compactes et tendres d'un vert pomme (P. S. = 2,4).

Pimélite (34 à 36. SiO^2; 5 à 15,5. NiO; 5 à 23. Al^2O^3; 21 à 38. H^2O), en fragments amorphes ou enduits vert-pomme, presque infusibles au chalumeau.

Garniérite, sorte d'halloysite colorée en vert pâle par le nickel, trouvée par M. Garnier dans la Nouvelle-Calédonie, en association avec la serpentine.

Nouméite de Nouméa (Nouvelle-Calédonie), variété d'un vert foncé, onctueuse, contenant de 0 à 32. NiO et 10,5 à 25. MgO et répondant à peu près, selon M. Liversidge, à la formule $H^6(Mg,Ni)^{10}Si^8O^{29}$.

Plusieurs auteurs considèrent la Garniérite et la Nouméite comme de simples hydrosilicates de magnésie imprégnés d'oxyde de nickel.

MINERAIS DE ZINC

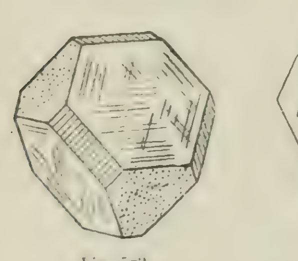
MINERAIS NON OXYDÉS

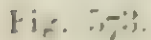
SULFURES

Blende. ZnS. — P. S. = 3,9 à 4,1. — D. = 3,5 à 4.

S. cubique (en apparence), avec polyèdre hémiaxe dichosymétrique.

Combinaisons : p, $\frac{1}{2}\,a^1$ droit, $\frac{1}{2}\,a^1$ gauche (fig. 573), donnant aux cristaux une apparence holoédrique ; mais en général les faces des deux tétraèdres conjugués n'ont pas les mêmes caractères physiques, les unes étant polies, les autres




Fig. 573.

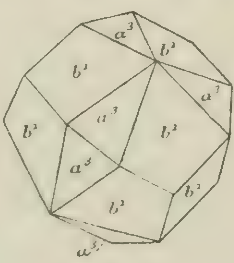


Fig. 574.

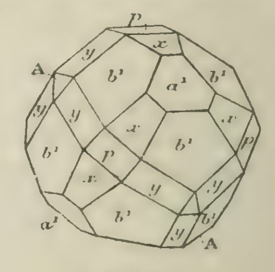


Fig. 575.

rudes et caverneuses. Quant aux faces cubiques, qui tronquent les intersections mutuelles des deux tétraèdres, elles sont striées parallèlement aux axes binaires ; b^1, $\frac{1}{2}\,a^3$ (fig. 574) ; b^1, $\frac{1}{2}\,a^1$ droit, $\frac{1}{2}\,a^1$ gauche, $\frac{1}{2}\,a^3$; p, b^1, $\frac{1}{2}\,a^1$ droit, A, x, y (fig. 575), avec A = $\frac{1}{2}\,a^1$ inverse ; $x = \frac{1}{2}\,a^3$ direct ; $y = \frac{1}{2}\,a^2$ inverse, etc.

Les cristaux sont généralement maclés par juxtaposition non symétrique suivant a^1. Ainsi, dans la figure 576, deux octaèdres, ou plutôt deux groupes

de deux tétraèdres conjugués, sont associés conformément à cette loi, qui est celle des spinelles. La même macle associe parfois deux rhombododécaèdres b^1 (avec les faces de $\frac{1}{2} a^1$ direct et $\frac{1}{2} a^1$ inverse); ou deux cubes portant les troncatures a^1 (fig. 577).

Dans ces différents cas, comme dans celui de la fig. 578, où chaque individu de la macle porte, avec les tétraèdres conjugués, les faces du cube p, la macle paraît géométriquement symétrique. Mais en réalité elle ne l'est pas, ce dont

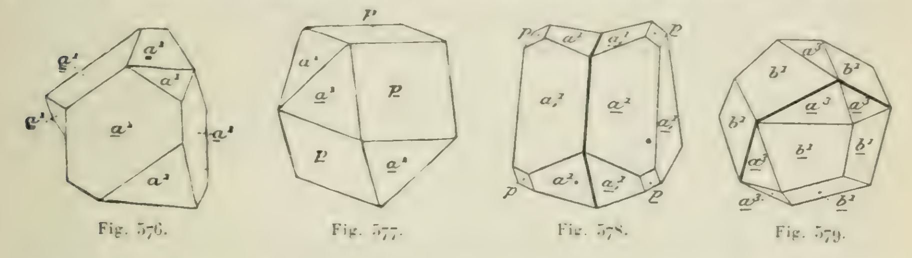


Fig. 576. Fig. 577. Fig. 578. Fig. 579.

on s'aperçoit à ce que les faces d'un tétraèdre poli, tel que a^1, ont pour symétriques celles d'un tétraèdre strié, $a_{,}^{1}$.

Mais quand la macle suivant a^1 se fait entre deux cristaux du type de la figure 574, elle donne un cristal (fig. 579) qui n'est symétrique ni géométriquement ni physiquement.

Ces macles sont susceptibles de se répéter plusieurs fois, en faisant naître des associations de lames hémitropes plus ou moins minces.

Clivage parfait suivant les six faces de b^1. On remarque pourtant que les six clivages ne semblent pas se produire tous avec la même facilité.

Éclat adamantin, quelquefois gras, transparence parfois tout à fait complète. Ind. $=$ 2,369 (raie D). Couleur brune ou noire, verte, jaune de miel, rouge. Poussière jaune ou brune, plus rarement blanche. Très cassante; cassure lamelleuse ou conchoïdale. Phosphorescence fréquente par frottement ou par écrasement. Pyroélectrique, avec les axes du tétraèdre pour axes de pyroélectricité (Friedel). Plusieurs variétés se montrent biréfringentes.

La composition de la blende admet parfois 20 % de fer, de sorte que sa formule pourrait s'écrire (Zn,Fe)S. On y trouve aussi du cadmium, du manganèse et on y a également indiqué du gallium, de l'indium et du thallium.

Ch. Décrépite souvent avec force, mais ne fond presque pas. Réact. 39, 41,85. Avec soude, sur charbon, colore la flamme en vert foncé. Lentement soluble à chaud dans l'acide chlorhydrique, avec dégagement d'hydrogène sulfuré,

La blende accompagne le plus souvent la galène. Mais elle se présente aussi, à l'état isolé, en jolis cristaux, dans la dolomie du Binnenthal, et l'on en trouve de très gros individus, d'un jaune miel rougeâtre, remarquables par leurs clivages et leur transparence, dans les fentes d'un calcaire noirâtre du pic d'Europa (Asturies).

Étym. : *Blende* est un vieux mot allemand qui signifie *trompeur*, parce que l'espèce était autrefois confondue avec la galène. Pour le même motif, on a quelquefois employé, pour la désigner, le mot *Sphalérite* (σφαλερός, traître).

Le sulfure de zinc est dimorphe ; car M. Ch. Friedel a observé en 1861, dans un minerai d'Oruro, en Bolivie, des cristaux hexagonaux, répondant à la formule ZnS, avec P. S. = 3,98 et D. = 3,5 à 4, qui offraient les caractères chimiques de la blende et dont il a fait une espèce nouvelle, la **Wurtzite** (dédiée à Wurtz). De son côté, en 1862, Breithaupt constatait que la blende cadmifère et rayonnée de Przibram était hexagonale, avec clivage p, et la décrivait sous le nom de **Spiautérite** (de *Spiauter*, nom vulgaire du zinc). Depuis, M. Em. Bertrand a reconnu le caractère optiquement uniaxe et positif de la blende de Przibram, propriété conforme à celle de la Wurtzite.

La Wurtzite a été reproduite artificiellement et on a trouvé R. A. = 1 : 0,817. Signe positif. Henri Sainte-Claire Deville avait obtenu la Wurtzite par le passage d'un courant d'hydrogène sur du sulfure de zinc amorphe.

Il est à remarquer que, par sa forme et par la valeur de l'angle pb^1, la Wurtzite est isomorphe avec le *Cadmium sulfuré* ou **Greenockite**, substance d'un beau jaune, en prismes hexagonaux courts, $mb^{1}/_{2}b^1b^2p$, donnant sur le charbon un enduit rouge brun.

On trouve, pour la Greenockite, P. S. = 4,9 à 5. — D. = 3 à 3,5 ; R. A. = 1 : 0,811 : b^1b^1 = 86°21′ sur m ; $b^{1}/_{2}b^{1}/_{2}$ = 123°54′ sur m. Clivages m et p. Signe opt. positif. n_p = 2,688.

D'après Mallard (1), la symétrie cubique de la blende n'est qu'apparente et cette espèce serait formée par des hémitropies submicroscopiques de Wurtzite. C'est surtout le cas pour toutes les *blendes écailleuses* (*Schalenblende*). D'ordinaire les fibres, très minces, d'orientations différentes, se superposent de manière à annuler la double réfraction. Mais la chaleur, en produisant un nouvel arrangement, permet aux fibres de s'orienter de la même façon, et alors la biréfringence se manifeste avec toute son énergie.

MINERAIS OXYDÉS

OXYDES ET CARBONATES

Zincite. ZnO. — P. S. = 5,4 à 5,7. — D. = 4 à 4,5.

S. hexagonal. R. A. = 1 : 1,621 ; b^1b^1 sur a^1 = 123°46′ (2). Clivages parfaits m et p.

Masses laminaires ou grains à structure foliacée, d'éclat assez vif, d'un rouge orangé clair : optiquement positive. Souvent manganésifère.

(1) *Bull. Soc. minéral.*, 1882, p. 236. — (2) Ces chiffres sont ceux de Naumann-Zirkel. D'autres auteurs indiquent R. A. = 1 : 1,603 et b^1b^1 = 127°48′.

Ch. Devient noire, à chaud, dans le tube et reprend ensuite sa couleur. Réact. 39. Avec les flux, réactions du manganèse. Soluble sans effervescence dans les acides.

Accompagne la franklinite avec calcite dans le New-Jersey.

La Zincite artificiellement produite dans les usines (R. A. = 1 : 1,622) manifeste un hémimorphisme que trahissent aussi, sur les faces de clivage de la zincite naturelle, les figures de corrosion, non symétriques relativement au plan p.

Franklinite. $(Zn,Fe,Mn)(Fe,Mn)^2O^4$. — P. S. = 5 à 5,1. — D. = 6 à 6,5.

Cette espèce est un véritable spinelle de fer, cristallisant en octaèdres réguliers, comme tous les spinellides. L'analyse donne 10 à 25. ZnO; 3,75. MnO; 7, 58. FeO; 8,32. Mn^2O^3; 58 à 64. Fe^2O^3, avec 0,8. Al^2O^3.

Forme dominante : a^1, très souvent modifié par b^1. Clivage a^1 très imparfait. Noir de fer, éclat métallique; poussière brun rouge foncé; en lames minces, couleur rouge sang. Infusible. Parfois faiblement magnétique. Lentement soluble dans l'acide chlorhydrique en dégageant un peu de chlore; avec le borax, donne à la flamme oxydante une perle améthyste ou rouge et à la flamme réductrice une perle verte.

Étym. : Localité de Franklin-Furnace (New-Jersey).

Smithsonite. $ZnCO^3$. — P. S. = 4,3 à 4,45. — D. = 5.

S. rhomboédrique. R. A. = 1 : 0,806; pp = 107°40′ (Wollaston).

Formes usuelles : p, e^3, d^2; on connaît aussi $a^1, b^1, e^{4}/_{3}, e^{5}/_{2}, d^1$. Combinaisons : p; e^3; pb^1; pd^1; $pe^{4}/_{3}$ (fig. 580), avec $e^{4}/_{3}\ e^{4}/_{3}$ = 68°14′; $e^{4}/_{3}p$ = 122°13′; a^1pe^3; pd^1e^1, etc. Faces p ordinairement courbes et rugueuses. Clivage p parfait. Biréfringence énergique, négative. Incolore, blanche, jaunâtre, grisâtre.

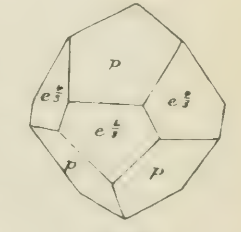


Fig. 580.

Cristaux ordinairement très petits, dans des géodes ou en croûtes et enduits stalagmitiques (Laurium), de couleurs variables du blanc au vert.

Ch. Infusible. Réact. 39, 85. Facilement soluble avec effervescence dans l'acide chlorhydrique; soluble dans la potasse caustique.

Étym. : Dédiée à Smithson ; a souvent été confondue, sous le nom de *calamine*, avec l'hydrosilicate de zinc.

La Smithsonite ou *Zinc carbonaté* appartient à la famille des carbonates rhomboédriques; elle est isomorphe avec la Sidérose et la Dialogite. Aussi existe-t-il des variétés ferrifères (*Capnite* ou *Monheimite*) et d'autres manganésifères (*Manganzinkspath*). La Monheimite a R.A. = 1 : 0,817 et pp = 107°3′.

La **Zinconise** ou **Hydrozincite** (*calamine terreuse* des anciens auteurs)

est un hydrocarbonate, $H^4Zn^3CO^3$. — P. S. = 3,25 à 3,59. = D. 2 à 2,5. La substance est amorphe, d'un blanc pur ou grisâtre, en masses rognonneuses, stalagmitiques, concrétionnées. Réact. 23, avec les autres caractères de la Smithsonite.

Etym. : Nom formé, par Beudant, de zinc et de κόνις, poudre.

SULFATES, PHOSPHATE, ARSÉNIATES

Un sulfate anhydre de zinc, la **Zincosite**, $ZnSO^4$, isomorphe avec l'Anglésite et la Barytine, a été rencontré, en très petits cristaux jaunâtres, dans la Sierra Almagrera (Espagne). — P. S. = 4,33. — D. = 3.

Goslarite. $H^{14}ZnSO^{11}$. — P. S. = 2 à 2,1. — D. = 2 à 2,5.

S. rhombique. R. A. = 0,980 : 1 : 0,563. mm = 90°42′. Clivage g^1 parfait.

Opt. Négative. n_m = 1,484. Biss. normale à h^1. A. O. dans p; 2V = 45°,6; 2 E = 70°,2.

Cette espèce, trouvée dans les mines du Rammelsberg, près de Goslar (Hanovre), est isomorphe avec l'Epsomite. Blanche ou rougeâtre, de saveur styptique, elle fond avec boursouflement au chalumeau.

MM. Bertrand et Damour ont donné le nom de **Zincaluminite** à un alun de zinc trouvé au Laurium et contenant 12,94. SO^3; 25,48. Al^2O^3; 34,69. ZnO; 1,85. CuO et 25,04. H^2O. Les cristaux, en petites plaques hexagonales minces, légèrement bleuâtres, sont optiquement négatifs et paraissent dériver d'un prisme rhombique de 120 degrés. — P. S = 2,5 à 3.

Hopéite. — P. S = 2,76. — D. = 2,5 à 3. — S. rhombique. R. A. = 0,572 : 1 : 0,472; mm = 120°26′; $b^{1/2}b^{1/2}$ = 106°14′ sur g^1 et 139°58′ sur h^1,

Cette espèce, très rare, en cristaux $pa^1b^{1/2}h^1g^1g^3$ (avec g^3g^3 = 82°20′ en avant), à clivage h^1 parfait, ou en masses réniformes, d'un blanc grisâtre, est optiquement négative, avec $\rho < v$; Biss. normale à g^1. A. O. dans p; 2E = 52°.

La Hopéite (dédiée au prof. Hope) a été considérée par M. Damour comme un phosphate hydraté de zinc. En effet, MM. Friedel et Sarasin ont produit artificiellement des cristaux répondant à la formule $H^8Zn^3P^2O^{13}$, qui possédaient la forme et les propriétés optiques de la Hopéite.

Adamine. $H^2Zn^4As^2O^{10}$. — P. S. = 4,3. — D. = 3,5.

S. rhombique. R. A. = 0,977 : 1 : 0,725; mm = 91°15′; a^1a^1 = 107°56′ sur p. Formes $mh^1g^3g^1a^1$: $ma^1b^{1/2}$; a^1 et g^3 dominent généralement. Clivage a^1 net.

Opt. Positive; $\rho < v$; Biss. normale à g^1; A. O. dans p. 2V = 87°,6; 2 H = 108°,6 (rouge).

Cristaux violacés arrondis ou grains cristallins jaune-miel au Chili. Enduits rose ou rouge carmin au cap Garonne (Var). Cristaux incolores ou d'un vert émeraude implantés sur Smithsonite au Laurium. Les cristaux incolores ont, d'après M. Laspeyres, un autre paramètre vertical que les cristaux verts.

L'Adamine (dédiée au minéralogiste français Adam) est isomorphe avec l'olivénite ou arséniate hydraté de cuivre.

Un autre arséniate hydraté de zinc, la **Köttigite** (dédiée à M. Köttig), trouvé en Saxe, renferme 7 parties d'oxyde de cobalt pour 30 d'oxyde de zinc. Cette espèce est de nuance fleur de pêcher et isomorphe avec l'Érythrine.

SILICATES

Willémite. Zn^2SiO^4. — P. S. = 3,7 à 4,2. — D. = 5,5.

S. rhomboédrique. R. A. = 1 : 0,674 ; pp = 116°1′.

Combinaisons : $a^{10}e^2$ (Moresnet, petits cristaux, avec $a^{10}a^{10}$ = 128°30′); $pb^1d^2d^1$ (Franklin). Clivages : a^1 facile, à Moresnet; d^1 facile, à Franklin. Éclat vitreux. Incolore, jaune ou brune. Biréfringence assez énergique, de signe positif.

Ch. Difficilement fusible sur les bords; devient opaque. Soluble en gelée dans l'acide chlorhydrique.

En petits cristaux jaunes ou blancs et en masses compactes à Moresnet, Stolberg, etc., avec calamine.

Étym. : Dédiée à Guillaume (Wilhelm) Ier, roi de Hollande.

La **Troostite** $(Mn,Zn)^2SiO^4$ est isomorphe avec la Willémite; verte, jaune ou rosée, elle accompagne souvent la Franklinite (P. S. = 4 à 4,1. — D. = 5,5).

Calamine (1). $H^2Zn^2SiO^5$. — P. S. = 3,35 à 3,5. — D. = 5.

S. rhombique avec polyèdre hémiaxe. R. A. = 0,778 : 1 : 0,476 (2); mm = 104°13′; $pa^1/_3$ = 118°34′; $pe\,^1/_3$ = 124°58′; g^1e_3 = 129°7′.

Combinaisons : mg^1pe_3 (fig. 581); $mh^1g^1pa^1{}_3e^1{}_3e_2$ (fig. 582). Ces deux formes accusent nettement l'hémiédrie par la dyssymétrie des deux extrémités de l'axe vertical, l'une basée, l'autre pointue; $mg^1a^1{}_3e^1e^1{}_3$, etc. Les cristaux de la Vieille-Montagne sont les plus riches en formes.

Faces g^1 souvent prédominantes, striées suivant mg^1. Macles de deux individus soudés en p. La même macle, où l'un des deux cristaux a tourné de 180° autour de l'axe a. Clivages : m facile et parfait; a^1 moins parfait; p peu net. Biréfringence énergique, de signe positif. Très forte dispersion. Couleurs

(1) Les mineurs ont coutume de confondre, sous le nom de *calamine*, les minerais oxydés du zinc, c'est-à-dire les carbonates et les silicates. D'accord avec la plupart des minéralogistes français, nous réservons le nom à l'hydrosilicate. Notons cependant que Delafosse, à l'exemple de Phillips et de Miller, a appelé Smithsonite le silicate et Calamine le carbonate. — (2) Les mesures de M. Schrauf donneraient 0,783 : 1 : 0,478, avec mm = 103°50′.

des hyperboles très vives ; $\rho > v$. Biss. normale à p ; A. O. dans h^1. $2V = 46^0,1$; $2V = 78^0,6$. $n_g = 1,635$; $n_m = 1,618$; $n_p = 1,615$.

Éclat vitreux ; nacré sur g^1. Incolore, grise, jaunâtre, brune, verte, bleu de ciel. Phosphorescente par frottement. Pyroélectrique avec pôle antilogue e_3 et

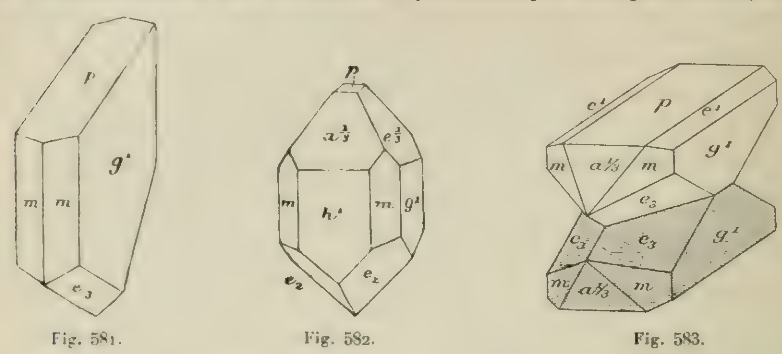


Fig. 581. Fig. 582. Fig. 583.

pôle analogue p (fig. 581). Quelquefois une macle de deux cristaux accolés suivant p (fig. 583) supprime la pyroélectricité.

Ch. Infusible ; mais se gonfle ou décrépite et jette un vif éclat. Réact. 23, 39. Avec la solution de cobalt, se colore en bleu et seulement par places en vert. Soluble en gelée dans les acides. L'ammoniaque y donne un précipité qui se redissout dans un excès de réactif.

En cristaux dans des druses, en boules, en masses stalactitiques. Les cristaux des druses sont généralement implantés par l'extrémité qui porte e_3.

Étym. : *Lapis calaminaris* d'Agricola.

MINERAIS D'ÉTAIN

L'**Étain** natif est très rare. Quadratique à l'état naturel et rhombique en cristaux artificiels (P. S. = 7,17), il a été trouvé en grains roulés, seul ou associé à l'or.

Stannine. $(Cu^2, Fe,Zn)^2SnS^4$.

Ce minéral, où l'on trouve 29 à 30. S ; 25 à 31. Sn ; 29 à 30. Cu ; 4 à 12. Fe ; 0 à 10. Zn, se rencontre en masses d'un gris d'acier, passant au jaune de bronze, dans les gîtes stannifères de Cornouailles et de Bohême. — P. S. = 4,3 à 4,51. — D. = 4.

On n'est pas d'accord sur la forme cristalline de la Stannine. Les uns la regardent comme cubique, avec clivages distincts p, b^1 et hémiédrie tétraédrique ; d'autres la considèrent comme quadratique, avec le même mode d'hémiédrie que la chalcopyrite.

Ch. Dans le tube ouvert, donne une odeur sulfureuse ; fond au chalumeau

avec enduit blanc d'acide stannique et résidu de cuivre et de fer. Donne avec l'acide azotique une liqueur bleue et un dépôt d'acide stannique.

Cassitérite. SnO^2. — P. S. = 6,96. D. = 6 à 7. — S. quadratique. R. A. = 1 : 0,951 (1); a^1a^1 sur p = 92°53′.

La Cassitérite ou *Étain oxydé* cristallise dans le système quadratique, avec prédominance habituelle de l'un des deux prismes carrés sur l'autre. Tandis que le prisme le plus ordinairement développé est noté h^1 par la plupart des cristallographes français, Dana et les auteurs allemands le notent m. La figure 584 correspond à la première hypothèse; elle montre une combinaison

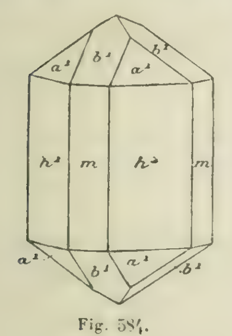


Fig. 584.

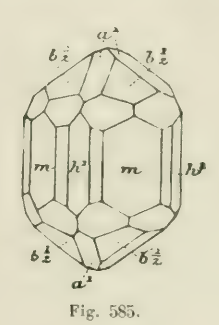


Fig. 585.

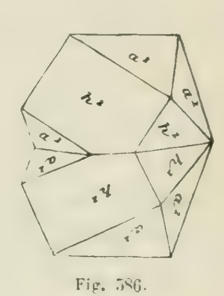


Fig. 586.

très fréquente, formée de $mh^1a^1b^1$. La figure 585 au contraire est notée conformément à l'hypothèse inverse; elle montre la combinaison $mh^1h^3a^1b^1/_2a_3$ laquelle, dans le système précédent, deviendrait $h^1mh^2b^1a^1a_2$. Si nous adoptons définitivement le système français, nous aurons pb^1 = 146°5′; a^1a^1 adj. = 121°40′. L'octaèdre a^1, seul, abonde à Montebras.

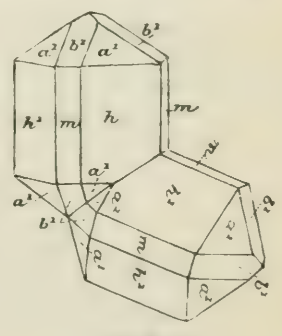


Fig. 587.

Macles fréquentes, par hémitropie normale à b^1, produisant le *bec d'étain* par la rencontre des quatre portions de pyramides a^1 (fig. 586). Le bec d'étain ou *visière* devient encore plus complexe quand (fig. 587) les cristaux composants ont la forme $mh^1a^1b^1$. Les axes de ces cristaux font entre eux un angle de 112°10′ et, sur le bec, les arêtes a^1a^1 déterminent un angle rentrant de 135°40′. — Clivages m et h^1 à peine distincts.

Opt. Signe positif. n_e = 2,079 (rouge); n_o = 1,9793 (rouge). Polychroïque dans les teintes jaunes et brunes.

(1) Les auteurs qui changent m en h^1 prennent R. A. = 1 : 0,6724. Le rapport d'axes, ici adopté fait ressortir une symétrie très voisine de celle du cube. Les faces h^1 et p seraient celles du pseudo-cube, les faces a^1 et m celles du pseudo-dodécaèdre rhomboïdal (G. Friedel).

Ch. Infusible; facilement réduite sur le charbon, avec addition de soude, en étain métallique. Insoluble dans les acides.

Contient souvent du niobium.

En cristaux ou en masses amorphes, parfois concrétionnées avec fibres d'apparence ligneuse (*Étain de bois*), au milieu de filons de quartz, dans les pegmatites, avec apatite, mica blanc, topaze, mispickel, émeraude, fluorine, etc. Les cristaux ont l'éclat adamantin, une couleur variable du brun clair au noir. Souvent ils sont intimement pénétrés par des cristaux hexagonaux de béryl jaune verdâtre (La Villeder). Moins biréfringente que le rutile, la cassitérite donne, en plaque mince, des couleurs vives et non les gris d'ordre supérieur.

Étym. : χασσίτερος, nom grec de l'étain.

MINERAIS DE PLOMB

PLOMB NATIF

Le **Plomb**, Pb, est très rare à l'état natif. Il a cependant été rencontré au Mexique, en Suède, au Nassau. — P. S. = 11,445. — D. = 1,5. Éclat métallique; gris de plomb; malléable et ductile. La symétrie du plomb est cubique.

MINERAIS NON OXYDÉS

SULFURES, SÉLÉNIURES, TELLURURE

Galène. Pb S. — P. S. = 7,4 à 7,6. — D. = 2,5 à 2,75. — S. cubique.

Combinaisons : pa^1b^1 (fig. 588); $pa^1b^1a^1/_2$ (fig. 589); $pa^1a^1/_2a^1/_3$, les faces $a^1/_2$ et $a^1/_3$, substituées à b^1, produisant le même effet que des faces b^1 courbes

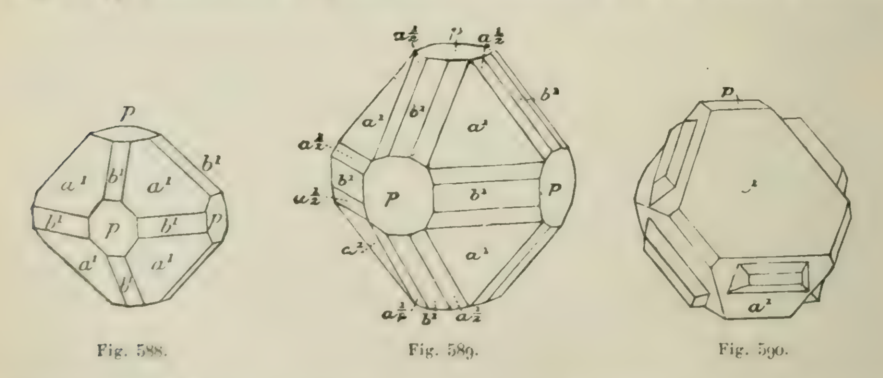


Fig. 588. Fig. 589. Fig. 590.

et striées; pa^1a^2, etc. On connaît 5 trioctaèdres, 12 trapézoèdres et 3 hexoctaèdres.

Macles fréquentes par hémitropie normale à a^1. Souvent les individus de la macle, munis des faces p et a^1, sont aplatis suivant une face a^1 et offrent l'aspect de la figure 590.

Cette même macle tabulaire se reproduit avec la forme a^1b^1 ($a^1b^1 = 144°44'$).

Clivage extraordinairement facile suivant les trois directions de p. Éclat métallique intense, excepté dans la variété compacte (*Bleischweif*). Exceptionnellement, clivage octaédrique. Couleur gris de plomb; poussière gris noirâtre. Thermoélectrique.

Contient généralement un peu de fer, de zinc, d'antimoine, parfois du sélénium et depuis 0,01 jusqu'à 1 % d'argent.

Ch. Réact. 30, 35, 38. Fond en bouillonnant sur le charbon. Partiellement soluble dans l'acide azotique avec séparation de soufre et formation de sulfate de plomb. La liqueur, traitée par une feuille de zinc, donne du plomb en lamelles.

Étym. : Le nom de *Galena* est usité dans Pline.

La galène pauvre en argent (*alquifoux*) est parfois exploitée pour faire du vernis de poterie.

La *Targionite* est une galène octaédrique, contenant 4 % d'antimoine, et la *Steinmannite* n'est également qu'une galène impure, renfermant de l'antimoine et de l'arsenic.

La **Clausthalite** (de Clausthal au Hartz) est un séléniure de plomb, PbSe, qui présente les caractères extérieurs de la galène, dont il se distingue parce qu'il donne dans le tube un anneau rouge de sélénium. P. S. = 8. — D. = 2,5 à 3. La **Zorgite** ressemble à la Clausthalite, mais contient de 4 à 13 % de cuivre.

L'**Altaïte** est un tellurure de plomb presque pur, PbTe, trouvé dans l'Altaï en masses d'un blanc d'étain, à clivages cubiques, rarement en cubes. P. S. = 8,16. — D. = 3 à 3,5. On l'a recueilli également en Amérique.

ARSÉNIOSULFURES, ANTIMONIOSULFURES

La **Sartorite** ou **Scléroclase** répond à la formule $PbAs^2S^4$. — P. S. = 5,39. — D. = 3. Elle est rhombique avec R. A. = 0,539 : 1 : 0,619; $mm = 123°21'$; $b^1/_2b^1/_2$ sur $m = 105°3'$; $b^1/_2b^1/_2 = 135°46'$ adj.

Gris de plomb. Poussière brun rouge.

Étym. : Dédiée à Sartorius.

La **Dufrénoysite**, $Pb^2As^2S^5$ (dédiée à Dufrénoy), est rhombique (1) (R. A. = 0,938 : 1,531 ; $mm = 93°39'$), en prismes aplatis suivant p, d'un gris d'acier ou de plomb. P. S. = 5,5. — D. = 3. Se trouve au val de Binn (Valais).

(1) Ou peut être monoclinique, avec $ph^1 = 89°26'$, si on change p en g^1, h^1 ou p, et g^1 en h^1 (Solly).

Il existe plusieurs antimoniosulfures de plomb, dont les principaux sont les suivants :

Zinckénite (dédiée à M. de Zincken). $PbSb^2S^4$, rhombique (R. A = 0,570 : 1 : 0,598 ; mm = 120°39′), isomorphe avec la scléroclase. P. S. = 5,3. — D. = 2 à 3,5. Gris d'acier foncé. Décrépite au chalumeau et se volatilise presque entièrement.

Jamesonite (dédiée à Jameson). $Pb^2Sb^2S^5$; rhombique (mm = 101°20′). Cristaux aciculaires gris d'acier. P. S. = 5,5 à 6. — D. = 2 à 2,5. Clivage p. La *Plumosite* (*Federerz*) ou *Hétéromorphite* est une Jamesonite capillaire.

Boulangérite (dédiée à Boulanger). $Pb^5Sb^4S^{11}$, connue surtout à l'état compact ou fibreux ; gris de plomb noirâtre. P. S. = 5,8 à 6. — D. = 2,5 à 3. Rhombique. R. A. = 0,553 : 1 : 0,748 ; mm = 122°8′. Abondante à Molières (Gard) ; se trouve aussi à Przibram.

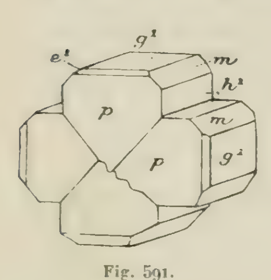


Fig. 591.

A la suite des sulfoantimoniures de plomb vient se placer la **Bournonite**, dont la composition, exprimée par la formule $Cu^6Pb^3Sb^2S^6$, comporte 42,4. Pb ; 13. Cu ; 25. Sb ; 19,6. S. L'espèce est rhombique, avec R. A. = 0,938 : 1 : 0,897 ; mm = 93°40′ ; pe^1 = 138°6′. — P. S. = 5,7 à 5,87. — D. = 2,5 à 3. Combinaisons : $pmh^1g^1a^1e^1b^1/_2$; $pa^2a^1e^1b^1$; plusieurs cristaux du type $mph^1g^1e^1$, maclés suivant une face m, et aplatis suivant p, se groupent (fig. 591) de manière à offrir l'apparence d'un pignon d'engrenage (d'où le nom de *Rädelerz*, ou minerai en roue, donné par les mineurs de Capnik).

Clivage imparfait g^1. Gris d'acier. Éclat métallique. Fragile.

Ch. Décrépite dans le tube fermé, en donnant un sublimé rouge. Réact. 30, 33. Sur le charbon, Réact. 42, puis 38 et, avec la soude, bouton de cuivre.

Étym. : Dédiée au comte de Bournon.

La **Freieslebénite**, $Pb^5Hg^{10}Sb^4S^{11}$, contient 30 % de plomb contre 22 à 23 d'argent et parfois 1 de cuivre. — P. S. = 6 à 6,4. — D. = 2 à 2,5.

L'espèce est monoclinique (R. A = 0,587 : 1 : 0,928 ; ph^1 = 92°14′ ; mm = 119°12′), en cristaux profondément cannelés, qui ressemblent à des roseaux (d'où le nom de *Schilfglaserz* que lui donnait Freiesleben en 1817). Couleur gris d'acier. Par une insufflation prolongée sur le charbon, on obtient un globule d'argent.

MINERAIS OXYDÉS

OXYDES

Massicot. PbO. — P. S. = 8. — D. = 2. — Jaune ou rougeâtre, pulvérulent ou en lamelles cristallines ; à Badenweiler dans le quartz et au Mexique dans certaines roches volcaniques.

Minium. Pb^3O^4. — P. S. = 4,6. — D. = 2 à 3. Rouge aurore, pulvérulent, trouvé en enduits sur la galène ou en pseudomorphoses; quand on le chauffe, devient jaune et fond facilement.

Plattnérite (dédiée à Plattner), PbO^2; oxyde noir, très rare. P. S. = 8,5.

CARBONATES, SULFATES, SULFOCARBONATES

Cérusite $PbCO^3$. — P. S. = 6,5. — D. = 3,5. — S. rhombique; R. A. = 0,610 : 1 : 0,723; $mm = 117°13'$; $b^1/_2m = 144°14'$; $pe^1/_2 = 124°39'$. (Isomorphe avec la withérite et l'aragonite).

Combinaisons: $e^1/_2b^1/_2$; mg^1; $mg^2g^1e^1/_2b^1/_2$ (fig. 592); $mg^1e^1/_2$; $pmg^1e^1b^1/_2$ (fig. 593), en cristaux fortement aplatis suivant g^1; etc. Les brachydomes et g^1 sont généralement striés suivant pg^1, et, en outre, g^1 porte des stries parallèles à mg^1.

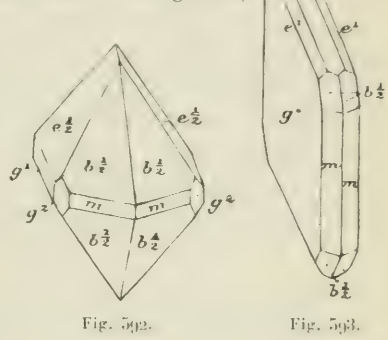


Fig. 592. Fig. 593.

Macles fréquentes, de 2 à 3 individus associés suivant les faces m; dans le premier cas, angles rentrants de 117°14' et de 62°46'; les cristaux maclés sont le plus souvent minces, aplatis parallèlement à g^1. Clivages assez nets m et $e^1/_2$. Cassure conchoïdale. Transparente ou translucide. Double réfraction énergique, négative; $\rho > v$. A. O. dans g^1. — Biss. normale à p. 2 V = 8°,1; $n_g = 2{,}077$; $n_m = 2{,}076$; $n_p = 1{,}803$.

Éclat adamantin ou résineux; incolore, blanche, jaunâtre, quelquefois colorée en vert ou bleu par du carbonate de cuivre. Poussière blanche.

Ch. Décrépite violemment; sur le charbon, facilement fusible; se réduit en un globule malléable, tachant le papier; soluble avec effervescence dans l'acide azotique étendu. La liqueur est précipitée par les acides sulfurique et chlorhydrique.

La Cérusite ou *Céruse* (*Weissbleierz*, ou *plomb blanc* des mineurs allemands) se présente en cristaux, en masses compactes, en stalactites, etc., à la partie supérieure des filons plombifères. Le *plomb carbonaté noir* (*Bleischwärze*) est un mélange de cérusite et de charbon.

Étym. : *Cerussa* de Pline.

Anglésite. $PbSO^4$. — P. S. = 6,29 à 6,35. — D. = 3.

S. rhombique. R. A. = 0,785 : 1 : 1,289; $mm = 103°43'$; $e^1e^1 = 104°24'$ sur g^1; $a^2a^2 = 101°13'$ sur p.

Combinaisons : ma^4; ma^2e^1 (Écosse); $mpa^2e^1b^1/_2$ (Sardaigne); mpa^4a^2 (cris-

taux tabulaires de Phœnixville); $m a^2 x$ (fig. 594) avec $x = \{ b^1 b^1/_3 g^1/_2 \}$ (cristaux octaédriques de Siegen); $mpa^2 e^1 g^1 g^3 x$ (fig. 595) (également de Siegen); $pma^2 h^1 e^1 e^1/_2 g^1 g^3 b^1/_2 x$ (crist. d'Anglesey); $pma^2 h^1 e^1 b^1/_2 x$ (cristaux de Monteponi). L'espèce est d'ailleurs isomorphe avec la barytine.

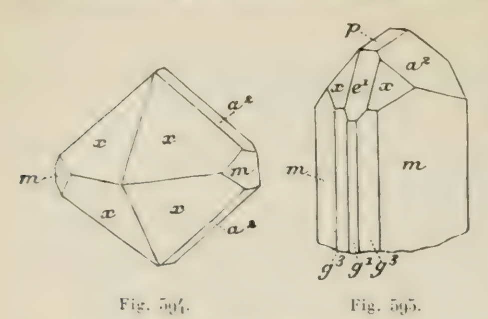


Fig. 594. Fig. 595.

Clivages p et m, imparfaits.

Cassure conchoïdale; transparente ou translucide. Éclat très vif, presque adamantin, parfois résineux. Incolore, blanche. Signe opt. positif. $\rho < v$. A. O. dans g^1. Biss. normale à h^1. $2V = 66°,8$; $2H = 89°,9$. $n_g = 1,8970$; $n_m = 1,8830$; $n_p = 1,8770$.

Ch. Décrépite et fond sur le charbon au feu d'oxydation. Réact. 35, 44. Soluble dans un excès d'acide azotique étendu.

Se présente en cristaux dans les cavités de la galène et en masses compactes.

Étym. : De l'île d'Anglesey, où l'espèce a d'abord été découverte.

La **Lanarkite** (de Lanark en Écosse), autrefois considérée comme un sulfocarbonate de plomb, est, d'après les analyses de M. Pisani, un sulfate anhydre, de formule Pb^2SO^5. — P. S. = 6,8 à 7. — D. = 2 à 2,5. — Syst. monoclinique. R. A. = 0,868 : 1 : 1,384 ; $ph^1 = 91°49'$; $mm = 98°6'$. Clivage p parfait. Cristaux allongés ou aciculaires, d'un blanc verdâtre ou jaunâtre.

La **Linarite**, de Linarès (Espagne), est un sulfate de plomb hydraté et cuprifère, d'un bleu d'azur, $H^2(Pb,Cu)^2SO^6$. Elle est monoclinique, avec R. A. = 1,719 : 1 : 0,827 ; $ph^1 = 102°38'$ et $mm = 61°41'$. Clivages : h^1 très facile, p moins facile.

L'association de l'acide sulfurique et de l'acide carbonique avec l'oxyde de plomb donne lieu à deux espèces minérales, qui toutes deux répondent à la formule $Pb^4C^3SO^{13} = 3\ PbCO^3) + PbSO^4$ et dont l'une est rhomboédrique, tandis que l'autre est rhombique, mais avec un angle voisin de 120°. C'est donc un cas bien caractérisé de dimorphisme.

La première est la **Susannite**, en cristaux rhomboédriques (R. A. = 1 : 2,21 ; $pp = 72°30'$), offrant les combinaisons pe^2 et a^1pe^2, avec clivage a^1 très facile. — P. S. = 2,55. — D. = 2,5.

Les cristaux sont petits, verdâtres ou jaunâtres, doués d'une énergique double réfraction négative, avec éclat résineux ou adamantin. Ils sont en partie solubles dans l'acide azotique avec effervescence et résidu de sulfate de plomb.

Étym. : De la mine Susannah, à Leadhills (Écosse).

La seconde espèce est la **Leadhillite** (également de Leadhills), offrant, avec un prisme rhombique de $mm = 120°20'$; $pe^1 = 128°22'30''$ (R.A. = 0,574 : 1 : 1,263), les combinaisons $pe^1{}_2 b^1{}_2$; $mg^1pb^1/_2e^1/_2$, etc. Les cristaux ont souvent l'apparence de rhomboèdres basés. — P. S. = 6,27 à 6,43. — D. = 2,5.

Macles fréquentes : 1° suivant m et g^2, enfermant les cristaux sous un contour de prisme hexagonal, avec angles sortants de 119°20' et 119°50' et angles rentrants de 179°20'; 2° suivant e^1. Clivage p très net et très facile. Double réfraction énergique, négative. A. O. dans g^1; $\rho < v$. Biss. normale à p. $n_m = 1,883$.

Éclat résineux, un peu adamantin; nacré sur p et sur les clivages. Blanc jaunâtre, gris verdâtre. Caractères chimiques de la Susannite.

L'identité des caractères de la Susannite et de la Leadhillite donne à penser que ces deux espèces n'en font qu'une et que la première doit sa symétrie ternaire à des groupements. En effet, dans des cristaux de Leadhilite de Matlock, M. Bertrand a constaté des plages grises biaxes et des plages vertes uniaxes (1).

M. Laspeyres a décrit, sous le nom de *Maxite*, un sulfocarbonate hydraté qu'il regarde comme un produit d'altération de la Leadhillite et qui serait monoclinique, mais avec symétrie-limite rhombique; car l'axe vertical fait avec la clinodiagonale un angle de 89°48'.

Un autre sulfocarbonate de plomb, melangé de cuivre, est la *Calédonite* (*Caledonia*, Écosse), $PbSO^4 + (Pb,Cu)CO^3$, espèce rhombique ($mm = 95°$).

PHOSPHATES, ARSÉNIATES, ETC.

Pyromorphite. $Pb^5P^3O^{12}Cl$. — P. S. = 6,5 à 7,1. — D. = 3,5 à 4. — S. hexagonal; R. A. = 1 : 0,736, $pb^1 = 139°38'$.

La pyromorphite est isomorphe avec l'apatite et fait partie d'une série à laquelle se rattachent l'arséniate et le vanadate de plomb. La chaux s'y substitue à l'oxyde de plomb au point d'abaisser la densité à 5, et d'autres fois l'arsenic remplace le phosphore, produisant le passage de la pyromorphite à la mimétèse. Enfin l'espèce renferme presque toujours du fluor.

Le prisme hexagonal m domine, combiné avec la base p, quelquefois avec la pyramide b^1. Traces de clivages suivant m et b^1. Faces m ordinairement striées suivant ma^1. Fréquemment en masses aciculaires, globuliformes ou botryoïdes. Cassure imparfaitement conchoïdale. Translucide. Éclat résineux ou adamantin. Signe opt. négatif. Anomalies optiques : la couleur oscille autour de deux types, le vert d'herbe et le brun (*plomb vert* et *plomb brun* des anciens minéralogistes); mais elle peut aussi être jaune. Du reste, toutes les variétés donnent une poussière jaunâtre et toutes fondent facilement sur le charbon en une perle d'un gris clair, qui se transforme par le refroidissement en un bouton polyédrique à nombreuses facettes (d'où le nom de l'espèce, tiré de πῦρ, feu, et μορφή, forme).

(1) *Comptes rendus*, LXXXVI, p. 348.

Pendant la formation de ce bouton, il se dépose sur le support un enduit blanchâtre de chlorure de plomb, entourant une auréole jaune d'oxyde. Réact. 13, 35. Dans le tube fermé, donne un sublimé blanc de chlorure de plomb. Soluble dans l'acide nitrique.

Accompagne la galène dans les parties supérieures des gîtes. On en trouve de très beaux cristaux dans les mines du Nassau, aux environs d'Ems (Holzappel, Fiedrichssegen, etc.).

La *Nuissiérite* est une variété impure, arsénifère et calcifère, de Nuissières (Rhône).

On a donné le nom de **Plombgomme** à un minéral dans lequel le phosphate de plomb est uni à un hydrate d'alumine et dont la composition, d'après M. Damour, peut être exprimée par $Pb^3P^2O^8 + 6(Al^2O^3,3H^2O)$. — P. S. = 4 à 6,4. — D. = 4 à 5.

Le plombgomme est en masses réniformes, globulaires ou botryoïdes, concrétionnées ou massives, à éclat résineux avec apparence gommeuse, optiquement uniaxes, d'après M. Em. Bertrand. La couleur est jaune, brune ou verdâtre. Se trouve au Huelgoat, avec galène et pyromorphite; à Nuissières, etc.

Ch. Décrépite. Réact. 23. Se gonfle comme une zéolite, sans fondre complètement. Réact. 38, 81.

Mimétèse ou **Mimétite**. $Pb^5As^3O^{12}Cl$. — P. S. = 6,92 à 7,3. — D. = 3,5. — S. hexagonal; isomorphe avec la pyromorphite; R. A. = 1 : 0,728; $pb^1 = 139°58'$; b^1b^1 adj. = 142°29'.

Combinaison $pmb^1b^1/_2$, offrant souvent la forme de petits barils à cause de la courbure des pans, et masses cristallines ou compactes d'un jaune clair, passant à l'orangé ou au brun, d'éclat résineux assez vif. Clivage b^1 imparfait. Poussière blanche. Signe opt. négatif.

Ch. Dans le tube fermé, donne un sublimé blanc de chlorure de plomb. Réact. 32, 35. Avec le sel de phosphore saturé d'oxyde de cuivre, colore la flamme en bleu d'azur. Soluble dans l'acide azotique.

Une variété incolore et limpide, chargée de chaux et monoclinique, a reçu le nom d'*Hédyphane* (ἡδυφανής, agréable d'éclat).

Etym. : μιμητής, imitateur, à cause de sa ressemblance avec la pyromorphite.

L'isomorphisme chimique de la pyromorphite et de la mimétèse laisse prévoir l'existence de variétés intermédiaires, telles que la *Campylite*, où le phosphore et l'arsenic se remplacent en diverses proportions, et qui affecte particulièrement la forme de barillets bruns. Il paraît cependant qu'il n'y a pas identité entre les deux types extrêmes. M. Em. Bertrand (1) a constaté que les

(1) *Bull. Soc. minéral.*, 1881, p. 36.

véritables pyromorphites sans arsenic du Huelgoat et du Nassau sont optiquement uniaxes, tandis que la mimétèse non phosphoreuse serait biaxe.

Une lame de mimétèse, normale à l'axe du prisme, se montre formée de six triangles équilatéraux, dont chacun correspond à un cristal rhombique de 120°, ayant son plan A. O. parallèle au côté de l'hexagone, avec bissectrice aiguë négative, parallèle à l'axe sénaire, et $\rho < v$.

Le même fait a été établi par MM. Jannettaz et Michel. Selon eux, il existe quatre types : les pyromorphites pures, uniaxes ; les mimétèses pures, biaxes ; des mélanges offrant pyromorphite au centre, mimétèse à l'extérieur ; enfin des groupements complexes, donnant naissance à des apparences uniaxes.

Ajoutons que, d'après les expériences de corrosion faites par M. Baumhauer, la mimétèse, considérée comme hexagonale, offrirait le même mode d'hémiédrie que l'apatite.

La **Beudantite** (dédiée à Beudant) est un phospho- ou arséniosulfate hydraté de plomb et de fer, contenant : 1 à 13. P^2O^5 ; 0 à 13. As^2O^5 ; 1 à 13. SO^3 ; 37 à 47. Fe^2O^3 ; 23 à 29. PbO ; 0 à 2. CuO ; 8 à 12. H^2O.

P. S. = 4 à 4,3. D. = 3,5 à 4,5. — S. rhomboédrique : $pp = 91°18'$ ou 86°30'. Vert olive ou noire ; se trouve dans le chapeau de fer de filons plombifères, notamment dans le Nassau, à Dernbach (variété *Dernbachite*).

MOLYBDATE, VANADATES, CHROMATES, TUNGSTATE

Wulfénite ou **Mélinose**. $PbMoO^4$. — P. S. = 6,3 à 6,9. — D. = 3.

S. quadratique avec polyèdre hémiaxe principal. R. A. = 1 : 1,581 ; $b^1/_2 b^1/_2$ sur $m = 131°41'$.

Tables pmh^2h^1, très aplaties suivant p ; octaèdres tronqués $pb^1/_2$ ou $pb^3/_2$ (fig. 596) ; tables $pb^1/_2 x$ (fig. 597), avec $x = {}^1/_2 h^7$; $pa^2b^3/_2$ (Arizona).

Clivages : $b^1/_2$ assez net : p moins distinct.

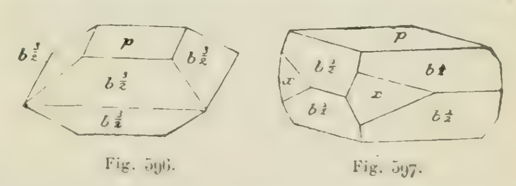


Fig. 596. Fig. 597.

Cristaux d'un jaune de cire ou jaune miel (d'où le nom de Mélinose et celui de *plomb jaune*). La couleur passe quelquefois au brun. Vif éclat.

Opt. Négative. $n_o = 2,402$ (rouge) ; $n_e = 2,304$.

Ch. Décrépite et fond facilement. Décomposée par l'acide chlorhydrique bouillant. Le résidu, additionné de zinc métallique, donne une liqueur bleue.

Étym. : Dédiée à Wulfen.

La **Vanadinite**, isomorphe avec la pyromorphite et l'apatite, est un chlorovanadate de plomb, de formule $Pb^5V^3O^{12}Cl$. — P. S. = 6,8 à 7,2. — D. = 3. —

R. A. = 1 : 0,727. Signe opt. négatif. Jaune orangé, brune ou rouge foncé, d'éclat vitreux, elle se présente en prismes hexagonaux, qui décrépitent dans le tube, fondent sur le charbon en laissant un enduit jaune et se dissolvent en liqueur verte dans l'acide chlorhydrique, avec résidu de chlorure de plomb. On l'a trouvée au Mexique, en Carinthie et en Écosse.

La série des vanadates de plomb est assez complexe. Mais il n'est pas démontré que tous soient spécifiquement différents (1). Le mieux déterminé est la **Descloizite** (dédiée à Des Cloizeaux). C'est un vanadate sans chlore, de couleur rouge ou brune, zincifère et hydraté $H^2(Pb,Zn)^4V^2O^{10}$. — P. S. = 5,8 à 6,1. — D. = 3,5. A l'acide vanadique est associée une certaine quantité d'acide arsénique. On avait d'abord considéré l'espèce comme monoclinique, avec R. A. = 0,648 : 1 : 0,802 et $mm = 114°7'$; $ph^1 = 90°34$. D'après Des Cloizeaux, l'espèce est rhombique avec $mm = 115°30'$. Des cristaux exceptionnellement gros du Nouveau-Mexique, étudiés par M. vom Rath, ont confirmé cette opinion. Le signe optique est négatif.

La *Vanadite* de Carinthie doit être considérée comme une Descloizite.

La *Cuprodescloizite* est une Descloizite cuprifère, qui, malgré des propriétés optiques en apparence différentes, ne paraît pas devoir être séparée de cette espèce. La *Tritochorite* serait identique avec la Descloizite.

La **Dechénite** (dédiée à M. de Dechen) est un vanadate de plomb, PbV^2O^6, un peu zincifère, en masses botryoïdes jaunes ou rouges, formant des veinules dans le grès bigarré de la Bavière rhénane. Mais on l'a trouvée aussi, en Carinthie, en petits cristaux rhombiques (R. A. = 0,835 : 1 : 0,654. — P. S. = 5,8. — D. = 3,5). M. Schrauf a rapporté cette espèce à la Descloizite.

L'**Eusynchite** du Brisgau est un vanadate $R^3V^2O^8$, où R = (Pb,Zn), dans la proportion de 3Pb pour 4Zn. Ce serait simplement une dechénite zincifère.

On a également décrit, sous le nom de **Chiléite**, un vanadate de plomb cuprifère du Chili. Quant aux vanadates connus sous les noms de ***Mottramite***, ***Ramirite***, etc., ils réclament des études plus précises avant d'être acceptés comme distincts.

Crocoïse. $PbCrO^4$. — P. S. = 5,9 à 6,1. — D. = 2,5 à 3.

S. monoclinique. R. A. = 0,960 : 1 : 0,918; $ph^1 = 102°33'$; $mm = 93°40'$; $d^1/_2 d^1/_2 = 119°11'$ en avant.

Combinaisons; $md^1/_2$ (fig. 598); $ma^1/_4$; $mb^1/_2 d^1/_2 o^1/_2$; $mg^3 g^1 d^1/_2 h^1 a^1/_3$ (fig. 599); la même avec $b^1/_2 e^1 e^1/_2 g^1$ et une hémiortho-pyramide postérieure, etc.

Clivages : m assez net; h^1 et g^1 imparfaits.

Opt. Positive. A. O. dans g^1. Biss. dans l'angle obtus ph^1, faisant avec g^1h^1 un angle de 5°30'. $n_g = 2,667$ (rouge); $n_p = 2,203$.

La Crocoïse ou *plomb rouge de Sibérie* (*plomb chromaté*) se présente d'ordi-

(1) Voir Des Cloizeaux et Pisani *in Bull. Soc. minér.*, février 1889.

naire en lames ou en petits cristaux d'un beau rouge hyacinthe, transparents et fragiles, à éclat vitreux ou adamantin et à poussière jaune orangé.

Ch. Décrépite et fond en une scorie où nagent des globules de plomb. Réact. 49, 65. Attaquable à chaud par l'acide chlorhydrique, avec résidu de chlorure de plomb, en donnant une liqueur verte.

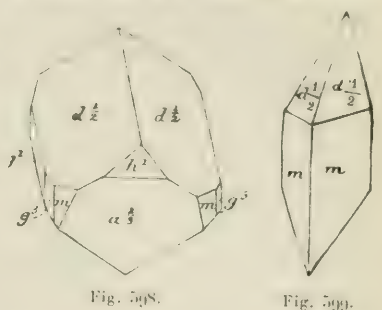


Fig. 598. Fig. 599.

Trouvée en Sibérie, à Bérésowsk, dans des filons quartzeux au milieu des roches primaires; au Brésil, dans un granite décomposé; en Australie.

Étym. : κρόκος, safran.

On connaît encore d'autres chromates de plomb; par exemple : la **Phœnicite** (φοινίκεος, rouge pourpre), en cristaux tabulaires rhombiques, d'un rouge cochenille, associés à la Crocoïse et offrant la composition $Pb^3Cr^2O^9$, et la **Vauquelinite** (dédiée au chimiste Vauquelin), à laquelle une analyse de Berzélius assignait la formule $Pb^2CuCr^2O^9$. Mais cette espèce (P. S. = 5,5 à 5.8. — D. = 2,5 à 3), qui se présente en petits cristaux monocliniques (mm = 109°35'; pm = 134°4'), d'un vert foncé ou d'un vert olive, contient de l'acide phosphorique et paraît devoir être identifiée avec la **Laxmannite**, phospho-chromate de plomb $(Pb,Cu)^3P^2Cr^2O^{17}$, en petits cristaux verts monocliniques (P. S. = 5,77. — D. = 3. — mm = 109°35'; ph^1 = 149°13'; pm = 134°35'), trouvée en Sibérie, au Brésil et en Écosse.

La **Scheelitine** (dédiée à Scheele), ou **Stolzite** (du nom de l'auteur de la découverte), est un tungstate de plomb $PbWO^4$. — P. S. = 7,9 à 8,1. — D. = 3. — S. quadratique avec hémiédrie pyramidale; R. A. = 1 : 1,567; c'est-à-dire que l'espèce est isomorphe avec la Scheelite. Petits cristaux pointus $mb^1/_2 b^1/_4$, avec $b^1/_2 b^1/_2$ = 131°25' sur m. Clivage $b^1/_2$ imparfait. Grise; éclat résineux, adamantin. Décomposée par l'acide nitrique, avec résidu jaune d'acide tungstique.

MINERAIS HALOIDES

CHLORURE, OXYCHLORURES, CHLOROCARBONATE, IODURE

La **Cotunnite**, $PbCl^2$, forme de petites aiguilles cristallines blanches, d'un vif éclat, à la surface des laves du Vésuve. P. S. = 5,23. Facilement fusible, en colorant la flamme en bleu. Sa forme primitive est le prisme rhombique de mm = 99°46'; pa^1 = 199°14'.

Étym. : Dédiée au médecin italien Cotugno.

Matlockite. Pb^2OCl^2. P. S. = 7,21. — D. = 2,5 à 3. — S. quadratique; R. A. = 1 : 1,763; $pa^1 = 119°34'$; $pb^1/_2 = 111°50'$.

Cristaux $pmb^1/_2a^1$, aplatis suivant p, avec clivage p imparfait, ou lamelles cristallines. Jaune miel ou verdâtre. Signe opt. négatif.

Ch. Décrépite dans le tube fermé en devenant plus jaune. Réact. 35. Avec le sel de phosphore et l'oxyde de cuivre, colore la flamme en bleu. Cet oxychlorure, trouvé près de Matlock (Derbyshire), a été observé depuis au Vésuve.

Il existe un autre oxychlorure, de formule $Pb^3O^2Cl^2$: c'est la **Mendipite** des Mendip Hills), en cristaux jaunâtres rhombiques; $mm = 102°36'$. — P. S. = 7 à 7,1. — D. = 2,5 à 3. Clivage m parfait. Éclat adamantin.

La *Laurionite* est un oxychlorure de plomb hydraté, en lamelles incolores allongées, que l'action de l'eau de mer a fait naître dans les cavités des anciennes scories du Laurium. Symétrie rhombique.

La **Phosgénite** ou *Plomb corné* est un chlorocarbonate de plomb $(PbCl)^2CO^3$, cristallisé dans le système quadratique (R. A. = 1 : 1,088). P. S. = 6 à 6,31. — D. = 2,75 à 3.

Beaux cristaux parfois jaunâtres, d'un vif éclat adamantin, $mph^1a^1b^5/_7$, avec clivage m, ou aiguilles cristallines. Signe opt. positif; $n_e = 2,14$; $n_o = 1,114$. Se rencontre aussi, en petits cristaux incolores, en compagnie de la Laurionite, dans les scories du Laurium.

Ch. Fond facilement en globule jaune, qui, par le refroidissement, devient blanc et cristallin. Réact. 35. Avec le sel de phosphore et l'oxyde de cuivre, donne la réaction du chlore. Décomposable à chaud par l'eau avec résidu de carbonate; soluble avec effervescence dans l'acide azotique.

La **Schwartzembergite** est un iodure de plomb, avec chlore et oxygène, de formule $Pb^3(I,Cl)^2O^2$, trouvé, en petits cristaux rhomboédriques d'un jaune de miel ou jaune paille, dans une mine du désert d'Atacama (Bolivie). Ce minéral fond très aisément au chalumeau; dans le tube fermé, il dégage d'abondantes vapeurs violettes d'iode. Sur le charbon, il donne un globule de plomb. — P. S. = 6,2 à 6,3. — D. = 2 à 2,5.

Étym. : Dédiée à M. Schwartzemberg, auteur de la découverte.

MINERAIS DE BISMUTH

BISMUTH NATIF (1)

Le **Bismuth**, Bi, se rencontre à l'état natif dans les filons de cobalt et d'argent, sous la forme de masses lamelleuses ou granulaires, d'un blanc d'argent

(1) Les affinités du bismuth, son isomorphisme avec l'antimoine, la similitude de son sulfure avec la stibine, pourraient faire décrire ce corps à la suite de l'antimoine. Nous le plaçons ici à cause de sa fréquente association au plomb et au cuivre.

rougeâtre et en ramifications dendritiques, figurant des feuilles de fougères. Il cristallise en rhomboèdres cuboïdes de 87°40′ (R. A. = 1 : 1,304), avec clivages a^1 et e^1 (e^1e^1 = 69°28′). — P. S. = 9,7 à 9,83. — D. = 2 à 2,5.

Remarquablement thermoélectrique, surtout au contact de l'antimoine; fortement diamagnétique. Fusible à la bougie. Sur le charbon, répand des fumées qui laissent une auréole jaune. Soluble dans l'acide azotique concentré. La liqueur précipite par addition d'eau.

A Schneeberg, le bismuth est en veines dans un jaspe rouge, qu'on polit pour plaques d'ornement.

MINERAIS NON OXYDÉS

Bismuthine. Bi^2S^3. — P. S. = 6,4 à 6,6. — D. = 2 à 2,5.

S. rhombique; R. A. = 0,968 : 1 : 0,985; mm = 91°52′; a^1a^1 = 89°.

Cristaux aciculaires cannelés, d'un gris de plomb clair, semblables à ceux de la stibine, avec combinaison oscillatoire de m et de g^2. Clivage g^1 très facile.

Fusible à la bougie. Volatile avec enduit jaune sur le charbon.

La **Wittichénite** (de Wittichen en Souabe) est une bismuthine cuprifère, $Bi^2Cu^6S^6$, grise, à poussière noire et de symétrie rhombique. — P. S. = 4,3 à 4,5. — D. = 2,5.

La **Patrinite** ou **Aikinite** (*Nadelerz*) est un bismuth sulfuré plumbo-cuprifère, $Pb^2Cu^2Bi^2S^6$, en aiguilles (*Aciculite*) d'un gris de plomb, contenues dans un quartz aurifère de Sibérie. Symétrie rhombique (mm = 110°). — P. S. = 6,76. — D. = 2,5.

Citons encore la **Chiviatite**, $(Pb,Cu)^2Bi^6S^{11}$, la **Cosalite**, $Pb^2Bi^2S^3$ (rhombique), et l'**Emplectite**, $Cu^2Bi^2S^4$, également rhombique (mm = 102°42′).

Le Bismuth, associé à 35 % de tellure, avec du soufre et des traces de sélénium, forme la **Tétradymite** ou **Bornine**, $Bi^6Te^6S^3$, minéral rare, d'un gris clair très métallique, de symétrie rhomboédrique, avec clivage a^1 très facile. R. A. = 1 : 1,587; pp = 81°2′.

Combinaison $a^1e^{7/2}$ ($e^{7/2}e^{7/2}$ = 68°10′; $a^1e^{7/2}$ = 105°10′), en cristaux maclés dont trois s'appuient sur un individu central. — P. S. = 7,4 à 7,5. — D. = 1 à 2.

Les lames sont flexibles et tachent le papier. Réact. 9, 30, 31, 38.

Étym. : *Bornine* est le nom donné par Beudant en l'honneur de De Born. Le nom de *Tétradymite* s'applique au groupement de quatre rhomboèdres, étudié par Haidinger.

MINERAIS OXYDÉS

La **Bismite** ou **Bismuthocre** est un oxyde de bismuth, Bi^2O^3 (P. S. = 4,36), formant des enduits pulvérulents, d'un jaune verdâtre, à la surface de la bismuthine. Elle est rhombique avec mm = 101°32′.

La **Bismuthite**, $H^2Bi^6CO^{12}$, est un hydrocarbonate amorphe, vert serin ou

jaune, en masses terreuses, quelquefois pseudomorphiques de bismuthine. — P. S. = 6,2 à 7,6. — D. = 4 à 4,5. Soluble avec effervescence, en liqueur d'un jaune foncé, dans l'acide azotique.

Eulytine, $Bi^4Si^3O^{12}$. — P. S. = 6,1. — D. = 4,5 à 5.

L'Eulytine a été considérée d'abord comme appartenant au système cubique, avec hémiédrie tétraédrique. Elle se présente en petits tétraèdres pyramidés, à faces arrondies, d'un brun de girofle rougeâtre ou d'un jaune de miel. M. Em. Bertrand (1) a constaté que l'Eulytine était biréfringente et que sa forme résultait d'une macle entre quatre cristaux rhomboédriques, les faces p, a^1, a^2, b^1, du cristal pseudo-cubique, correspondant aux faces e^1, a^1, $e^1{}_{/4}$, p des cristaux rhomboédriques. L'Eulytine est optiquement négative.

Dans quelques cristaux, chacun des quatre rhomboèdres est lui-même formé de trois individus à axes optiques parallèles.

Ch. Fusible en perle brune avec fumées inodores; décrépite dans le matras. Réact. 23, 36, 88. Colore la flamme en vert bleuâtre, à cause de l'acide phosphorique, dont elle contient 3 %.

Étym. : εὔλυτος, facile à dissoudre (ou à fondre).

MINERAIS DE CUIVRE

CUIVRE NATIF

Cuivre. Cu. — P. S. = 8,5 à 8,9. — D. = 2,5 à 3.

S. cubique. Cristaux octaédriques a^1, avec les faces $p, b^1, b^2, b^3/_2, a^3$.

Macles fréquentes : 1° par hémitropie avec axe normal à a^1, entre deux cubes pyramidés, donnant parfois une sorte de pyramide dihexagonale; 2° même hémitropie entre deux cristaux a^1pb^1, allongés suivant pa^1 et produisant des prismes qui, dans l'Oural, se groupent en grand nombre, de façon à simuler un réseau à mailles de 60 degrés. Les cristaux octaédriques de cuivre sont groupés en chapelet. Malléable et très ductible. Fond à 780°.

L'état le plus habituel du cuivre natif est celui de masses filiformes réticulées et de plaques courbes, donnant à la gangue, qui les contient disséminées, une grande ténacité. Cette gangue est ordinairement trappéenne, amygdaloïde, zéolitique, et la manière d'être du cuivre, parfois soudé, mais non combiné à l'argent natif et souvent adhérent à des cristaux de calcite, ne laisse guère de doute sur l'espèce de galvanoplastie naturelle qui a amené le métal à cet état. Dans le Nassau, le cuivre figure, sous les diverses formes qui viennent d'être

(1) *Bull. Soc. minér.*, 1881, p. 61.

indiquées, dans le chapeau de filons qui, en profondeur, contiennent chalcopyrite, blende et galène.

MINERAIS NON OXYDÉS

SULFURES, SÉLÉNIURE

Chalcosine. Cu^2S. — P. S. = 5,5 à 5,8. — D. = 2,5 à 3.

S. rhombique. R. A. = 0,582 : 1 : 0,971 ; $mm = 119°35'$; $b^1{}_2b^1{}_2 = 125°22'$ sur m ; $b^3{}_2b^3{}_2 = 148°20'$ sur $h^1 = 65°40'$ sur m ; $pb^3{}_2 = 147°10'$; $pe^3{}_2 = 147°6'$; $mg^1 = 120°12'$.

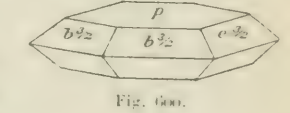


Fig. 600.

Cristaux aplatis, d'apparence hexagonale; pmg^1 ; $pb^3/_2e^3/_2$ (fig. 600) ; $pmg^1b^3/_2e^3/_2$. Les faces de la zone pg^1 sont habituellement striées parallèlement à leur axe.

Macles fréquentes : 1° par association de trois cristaux se touchant par les faces m et ayant le même axe vertical. De là résultent (l'angle mm étant très voisin de 120°) des apparences de prismes hexagonaux ou des groupements étoilés; 2° par hémitropie normale à b^1, auquel cas les cristaux tabulaires se croisent sous des angles de 88°; 3° par hémitropie normale à $e^3/_2$.

Clivage m imparfait. La Chalcosine, souvent en masses compactes et toujours d'un noir de fer bleuâtre, se laisse couper au couteau et donne même de petits copeaux lorsqu'elle est très pure.

Ch. En esquilles minces, fusible à la bougie; colore la flamme en bleuâtre. Facilement réductible sur le charbon, avec la soude, en un grain de cuivre. Soluble en vert dans l'acide azotique, avec résidu de soufre.

Étym. : χαλκός, cuivre.

Le sulfure Cu^2S est dimorphe; car celui qu'on produit artificiellement dans les laboratoires cristallise en octaèdres réguliers. Le sulfure à symétrie cubique n'a pas encore été rencontré dans la nature; mais il figure en mélange isomorphe avec le sulfure d'argent Ag^2S, pour former un minéral cubique nommé *Jalpaïte* (voir plus loin).

La Covelline (dédiée à M. Covelli) est un autre sulfure, CuS, en masses amorphes et en lamelles cristallines très ténues, d'un bleu indigo foncé, découvert sur les fumerolles du Vésuve et retrouvé depuis parmi les minerais de cuivre. P. S. = 4,6. — D. = 1,5 à 2. — S. hexagonal. R. A. = 1 : 3,972 (1) ; $b^1b^1 = 155°24'$ sur m ; formes pm ; $pb^1/_2b^1$. Le plus souvent en petites lamelles, à clivage facile p, parfois flexibles. Poussière noire. Réactions de la Chalcosine.

(1) Mallard admet le rapport 1 : 1,147, qui rend la Covelline isomorphe avec le Cinabre

La *Cantonite*, à clivages cubiques, de la mine de Canton en Géorgie, paraît être une pseudomorphose de galène en Covelline. Quant à l'*Alisonite*, c'est un mélange isomorphe de Covelline et de Galène.

Chalcopyrite ou **Pyrite de cuivre**. — $Cu^2Fe^2S^4$. — P. S. = 4,1 à 4,3. — D. = 3,5 à 4.

Composition habituelle : 32 à 34. Cu; 29 à 32. Fe; 33 à 36. S.

S. quadratique, avec polyèdre hémiaxe dichosymétrique non principal. R. A. = 1 : 0,985 (1).

D'après la valeur des paramètres, la symétrie de la Chalcopyrite est très voisine de la symétrie cubique. Aussi le sphénoèdre $\frac{1}{2}b^1/_2$ ressemble-t-il beaucoup au tétraèdre régulier. Ce sphénoèdre est d'ailleurs souvent combiné avec son inverse, dont les faces sont alors moins développées (fig. 601). Il en résulte une forme d'apparence octaédrique, mais où les angles, au lieu d'être de 109°28', comme dans l'octaèdre régulier, sont alternativement de 108°40' et de 109°53'. Quand le sphénoèdre est seul, ses angles sont de 70°7' et de 71°20'.

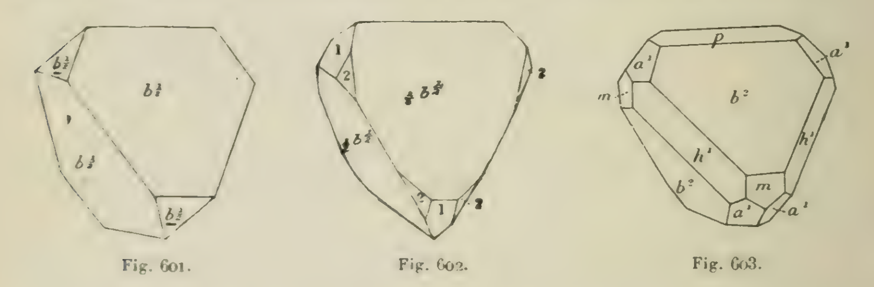


Fig. 601. Fig. 602. Fig. 603.

Les faces de celui des sphénoèdres que M. Sadebeck considère comme direct sont polies; celles du sphénoèdre inverse sont mates et striées.

On connait encore : $\frac{1}{2}b^1/_2$ direct avec $1 = \frac{1}{2}b^1/_2$ inverse et $2 = a^1/_2$ (fig. 602), p, m, $\frac{1}{2}b^1/_2$ direct, a^1, h^1 (fig. 603); $\frac{1}{2}b^1/_2$ dir., $\frac{1}{2}b^1/_2$ inv., a^1, $a^1/_2$. On peut aussi rencontrer la forme $\{b^1/_2 b^1/_4 h^1/_3\}$.

Angles : $pb^1/_2 = 125°40'$; $pa^1/_2 = 140°54'$; $pa^1 = 150°15'$; $a^1a^1 = 120°30'$ sur p; $a^1/_2 a^1/_2 = 101°49'$ sur p.

Macles fréquentes : 1° par pénétration mutuelle de deux sphénoèdres, dont les arêtes conjuguées sont croisées à angle droit; 2° par hémitropie normale à $b^1/_2$, comme dans les spinelles; cette macle pouvant se répéter plusieurs fois en donnant des masses composées de lames hémitropes; 3° par hémitropie normale à a^1, pouvant s'appliquer, soit à $b^1/_2$ (fig. 604), soit à $a^1/_2$ (fig. 605). Cette macle peut aussi se répéter de telle sorte que quatre individus viennent se grouper autour des faces inférieures d'un cinquième (fig. 606).

(1) M. G. Friedel admet R. A. = 1 : 1,9705 et note a^1 l'octaèdre habituellement noté $a^1/_2$.

Clivage $a^1/_2$, parfois assez net. Éclat métallique très vif; cassure inégale. Fragile. Couleur d'un jaune d'or foncé, à reflets parfois verdâtres, très souvent irisés, se distinguant par ses tons chauds de la pyrite de fer (1). Poussière d'un noir verdâtre.

Ch. Dans le tube fermé, décrépite et donne un sublimé de soufre. Réact. 30;

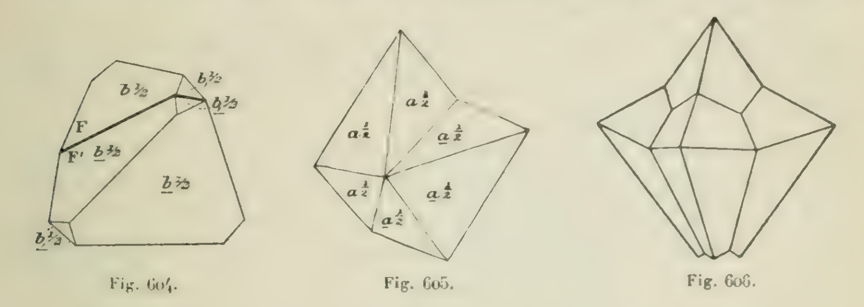


Fig. 604. Fig. 605. Fig. 606.

assez facilement fusible sur le charbon, en donnant des étincelles, avec réact. 37.

Avec les flux, perle verte par combinaison de la couleur bleue du cuivre et de la teinte jaune du fer. Soluble dans l'acide nitrique. Réact. 126 et 127.

La Chalcopyrite est, sous le nom de *Cuivre pyriteux*, le plus répandu des minerais de cuivre. Elle se présente souvent en grandes masses compactes, avec pyrite de fer et quartz.

Si l'on double la formule de la Chalcopyrite, on obtient $Cu^2Fe^2S^4$, qui peut s'écrire $Cu^2S + Fe^2S^3$. Cette formule, qui rend compte de la transformation assez fréquente de la Chalcopyrite en Chalcosine par perte de Fe^2S^3, est regardée par M. Knop comme le symbole rationnel de l'espèce. Quelquefois la transformation produit de la Covelline, CuS, ce qui explique la couleur bleue dont la Chalcopyrite est souvent recouverte par endroits.

La **Cubane** ou **Cubanite** de Cuba, moins riche en cuivre (21 %) que la Chalcopyrite, lui ressemble par sa couleur et ses réactions, hormis sa plus grande fusibilité au chalumeau. Mais elle est cubique, se clivant suivant trois directions rectangulaires. On lui donne pour formule $CuFe^2S^4$. — P. S. = 4 à 4,18. — D. = 4.

Érubescite. $Cu^6Fe^2S^6$. — P. S. = 4,9 à 5,4. — D. = 3.

S. cubique. — Formes p; pa^1; pa^2; b^1a^2. Macles par hémitropie normale à a^1. Traces de clivage a^1. Les cristaux sont d'ailleurs très rares et l'espèce se présente d'ordinaire en masses compactes, en rognons disséminés ou en incrustations. Fragile. Cassure inégale.

(1) D'ailleurs la Chalcopyrite est beaucoup moins dure que la pyrite.

L'Érubescite est le **Cuivre panaché** des anciens auteurs. On lui donne souvent aussi le nom de **Phillipsite** (qui a l'inconvénient d'être en même temps l'un des synonymes de l'harmotome calcaire).

Ce minéral, qui contient 50 à 70. Cu; 8 à 16. Fe; 20 à 28. S, est remarquable par sa couleur panachée (d'où son nom), intermédiaire entre le rouge de cuivre et le brun tombac, avec nuances irisées, très vives, de bleu et de violet.

Ch. Noircit sur le charbon et devient rouge par refroidissement; fusible et donnant après longue insufflation un globule gris magnétique, cassant. Autres réactions de la Chalcopyrite.

De belles masses d'Érubescite franchement panachée se rencontrent à Monte-Catini (Toscane) et à la Prugne (Allier). On a attribué leurs irisations à l'altérabilité du sulfure, Fe^2S^3, qui entre dans leur composition avec Cu^2S.

Étym. : Le nom d'Érubescite, qui rappelle les propriétés extérieures du minéral, avait été créé par J. Dana, qui l'a changé plus tard en celui de *Bornite* (en souvenir de B. de Born); mais ce dernier nom a le défaut d'être très voisin de celui de *Bornine*, qui a la même origine et s'applique au tellurure de bismuth.

La **Berzélianite** (dédiée à Berzélius) est un séléniure de cuivre, Cu^2Se, en enduits cristallins d'un blanc d'argent, très ductiles. Réact. 31.

ARSÉNIURES

Le cuivre, combiné avec l'arsenic, forme plusieurs espèces, savoir :

La **Domeykite** du Chili et du Mexique, Cu^6As^2, en masses noduleuses amorphes d'un blanc d'étain. — P. S. = 7 à 7,5. — D. = 3 à 3,5 (dédiée à M. Domeyko).

L'**Algodonite**, $Cu^{12}As^2$, en petites masses d'un blanc d'argent, ordinairement argentifères, de la mine d'Algodones (Chili). — P. S. = 6,90 à 7,62. — D. = 4.

La **Whitneyite**, $Cu^{18}As^2$, du Michigan, en masses cristallines d'un rouge très pâle. — P. S. = 8,47. — D. = 3,5.

ARSÉNIOSULFURES, ANTIMONIOSULFURES, CUIVRES GRIS

Enargite. Cu^3AsS^4. — P. S. = 4,36 à 4,47. — D. = 3.

S. rhombique; R. A. = 0,871 : 1 : 0,825; $mm = 97°53'$; $e^1e^1 = 100°58'$; $ph^1 = 136°37'$. Combinaisons m, p, h^1, g^1, avec e^1 et $b^1/_2$; clivage m parfait.

Noir de fer avec poussière noire; éclat métallique, très facilement fusible. Se trouve au Pérou, au Mexique et à Luçon.

Le composé Cu^3AsS^4 est d'ailleurs dimorphe, car M. Sandberger l'a retrouvé, avec la symétrie monoclinique, dans la **Clarite** de la mine de Clara (Forêt-Noire). P. S. = 4,46. — D. = 3,5.

Enfin la **Famatinite** de Famatina (République Argentine), considérée comme isomorphe avec l'Enargite, est antimonifère et sa formule est

$$Cu^3SbS^4. — P. S. = 4,57. — D. = 3,5.$$

La **Wolfsbergite** ou **Chalcostibite**, $Cu^2Sb^2S^4$, du Wolfsberg (Hartz), est un autre antimoniosulfure de cuivre, en petites tables rhombiques : $mm = 135°12'$; $g^3g^3 = 111°$ (1). — P. S. = 3,75 à 5,01. — D. = 3,5. Clivages : g^1 net ; p moins parfait ; gris de plomb, vif éclat, poussière noire.

La série des *Cuivres gris* (*Fahlerz*) comprend un certain nombre de sulfo-antimoniures ou de sulfo-arséniures de cuivre, souvent argentifères et intimement liés entre eux par leur forme tétraédrique, la grande variabilité de leur composition pouvant s'expliquer par des substitutions isomorphes.

On distingue, parmi les cuivres gris, les variétés antimoniales et les variétés arsenicales. Les unes et les autres possèdent les caractères cristallographiques suivants :

S. cubique, avec polyèdre hémiaxe dichosymétrique, ce qui donne la prééminence aux formes tétraédriques (d'où le nom de *Tétraédrite*, adopté par

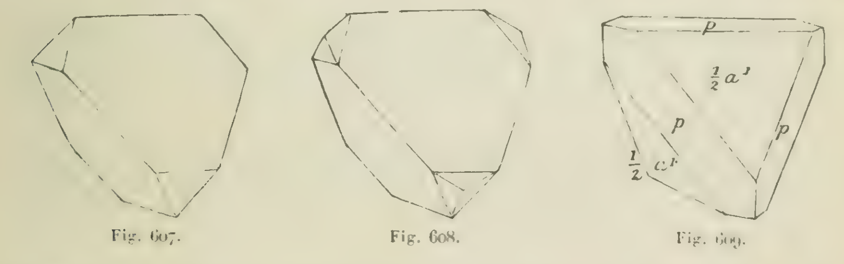


Fig. 607. Fig. 608. Fig. 609.

Delafosse et Haidinger). Combinaisons : $\frac{1}{2}a^1$; $\frac{1}{2}a^1$ direct et $\frac{1}{2}a^1$ inverse (fig. 607), ce dernier moins développé et ordinairement rugueux, tandis que le tétraèdre

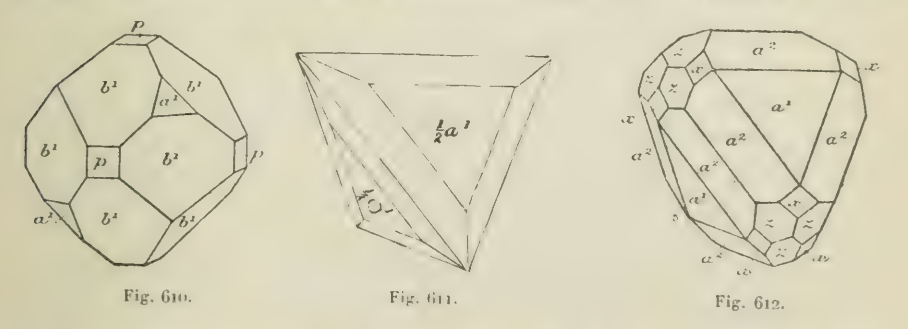


Fig. 610. Fig. 611. Fig. 612.

direct a ses faces brillantes ; $\frac{1}{2}a^1$, b^1 (fig. 608) ; p, $\frac{1}{2}a^1$ (fig. 609) ; p, b^1, $\frac{1}{2}a^1$ (fig. 610) ; $\frac{1}{2}a^2$, $\frac{1}{2}a^1$ (fig. 611) ; b^1, $\frac{1}{2}a^1$, $\frac{1}{2}a^2/_3$; b^1, $\frac{1}{2}a^1$, $\frac{1}{2}a^2$ dir. ; $b^1 = z$; $\frac{1}{2}a^1$, $\frac{1}{2}a^1$ dir., $x = \frac{1}{2}a^2$

(1) Certains auteurs admettent $mm = 101°$.

inv. fig. 612), le second hémitrapézoèdre moins développé que le premier; b^1, $\frac{1}{2}a^1$ direct, $\frac{1}{2}a^1$ inverse, $\frac{1}{2}a^2$ (fig. 613).

Macles fréquentes, notamment par hémitropie moléculaire, avec pénétration mutuelle des deux tétraèdres inverses (fig. 614). La macle suivant a^1 pour les

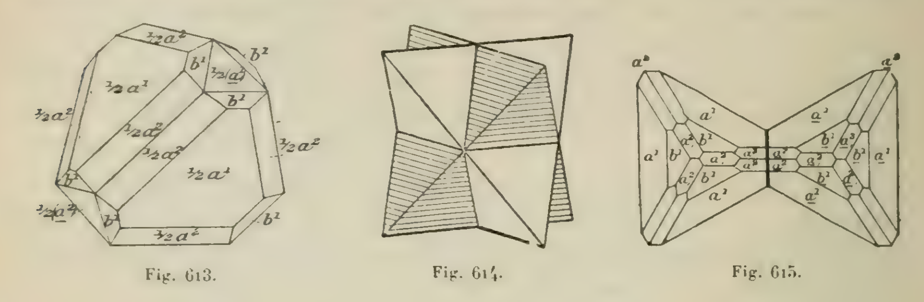


Fig. 613. Fig. 614. Fig. 615.

cristaux du type $^1/_2a^1$, $^1/_2a^2$, b^1, donne lieu à trois protubérances caractéristiques en bas de trois faces a^1. Rappelons également la macle, signalée par M. Sadebeck, entre deux cristaux accolés (fig. 615), suivant a^2, avec rotation autour d'un axe ternaire.

La **Panabase**, ou *Cuivre gris antimonial*, peut être considérée comme résultant du mélange isomorphe de $(Ag,Cu)^8Sb^2S^7$ avec $(Fe,Zn)^4Sb^2S^7$. Mais dans la même espèce viennent aussi se ranger des composés où l'arsenic s'associe à l'antimoine. — P. S. = 4,36 à 5,36. — D. = 3 à 4.

Clivage a^1 imparfait. Gris métallique, variant du gris d'acier au gris noir de fer. Poussière noire, tendant faiblement au rougeâtre dans les variétés zincifères. Fragile.

Souvent, par exemple en Cornouailles et à Clausthal, les cristaux de Panabase sont recouverts, sur toutes leurs faces, d'un enduit jaune brillant formé par des cristaux submicroscopiques de Chalcopyrite, parfois irisés. D'après M. Sadebeck, ces petits cristaux ont leur axe cristallographique parallèle à l'un des axes de la panabase qui leur sert de support.

Ch. Fond dans le tube fermé, en donnant un sublimé rouge foncé de sulfure d'antimoine, tandis que, dans le tube ouvert, il se fait un dépôt d'oxyde d'antimoine. Sur le charbon, donne les enduits et les fumées de l'antimoine, parfois de l'arsenic et du zinc (ce dernier avec réact. 85). Avec les flux, réactions du cuivre et quelquefois du fer.

La proportion de cuivre est la plus constante, se tenant entre 33 et 44 %. L'antimoine varie de 12,5 à 27; le zinc de 2 à 7, le soufre de 23 à 27, l'arsenic de 3 à 10, le fer de 1 à 4,5.

Étym. : πᾶν, tout, et βάσις, base; allusion faite par Beudant à la multiplicité des métaux composants. C'est cette panabase zincifère que Tschermak décrit spécialement sous le nom de *Tétraédrite*.

La *Freibergite* de Freiberg est une Panabase argentifère, ferrifère et parfois zincifère, de P. S. = 4,85 à 5.

On a donné les noms de **Schwatzite** et de **Spaniolite** à une variété mercurifère, connue d'abord à Schwatz (Tyrol), en cristaux noirs de fer b^1, $\frac{1}{2}a^1$, dans une gangue de barytine et pouvant contenir jusqu'à 20 °/₀ de mercure. L'antimoine y est associé à l'arsenic. — P. S. = 5 à 5,6.

On remarque que les cuivres gris antimonio-arsenicaux sont beaucoup moins riches en argent que ceux qui ne renferment pas d'arsenic.

Tennantite. $(Cu^8,Fe^4)As^2S^7$. — P. S. = 4,4 à 4,9. — D. = 3,5 à 5.

La Tennantite, ou *Cuivre gris arsenical*, possède les formes et la couleur de la Panabase, mais avec des nuances plus claires et une poussière d'un gris rougeâtre, allant jusqu'au rouge cerise foncé. Les clivages, d'ailleurs imparfaits, sont parallèles à b^1. Dans le tube ouvert, elle donne l'odeur arsenicale.

La variété non ferrifère de Szaszka (Banat) est facilement fusible en un globule non magnétique. Mais il en existe, à Redruth (Cornouailles) et à Skutterud (Norvège), une autre qui est précisément le minéral pour lequel Phillips a créé le nom de *Tennantite* (en l'honneur du minéralogiste Tennant). Celle-ci fond au chalumeau en un globule magnétique. La *Kupferblende* de Freiberg en est une variété, où le fer est en majeure partie remplacé par du zinc (9 °/₀). On en doit rapprocher aussi la *Sandbergérite* (dédiée à Sandberger), également zincifère.

La Tennantite non ferrifère contient jusqu'à 55 °/₀ de cuivre. Les autres n'en renferment pas beaucoup plus de 43 à 45. On n'y trouve d'ailleurs ni argent ni mercure.

MINERAIS OXYDÉS

OXYDES

Cuprite. Cu^2O. — P. S. = 5,7 à 6. — D. = 3,5 à 5.

S. cubique. Combinaisons a^1; a^1p; p; a^1b^1 avec a^1 dominant (fig. 616); a^1b^1 avec b^1 dominant (fig. 617); formes $a^1/_2$ et a^2 plus rares; parfois b^5. Clivage a^1 assez net. Fragile. Cassure rougeâtre, à éclat métallique prononcé; poussière rouge brique. La cuprite de Cornouailles forme souvent des cristaux cubiques et translucides, d'un rouge cochenille foncé, dont la réfringence dépasse celle du diamant. Ind. = 2,849 pour la lumière rouge. La variété de Sibérie,

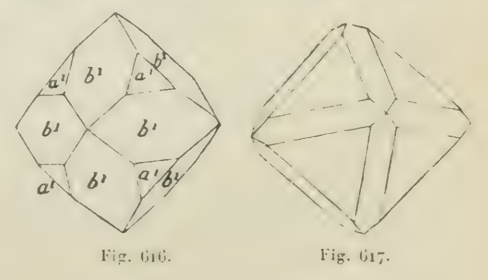


Fig. 616. Fig. 617.

en petits cristaux octaédriques groupés et en masses terreuses, avec mélange de limonite, est généralement d'un rouge de *brique* (d'où le nom de *Ziegelerz*, dont Beudant avait fait *Zigueline*). Les beaux cristaux octaédriques ou dodécaédriques de Chessy, isolés dans une argile ocreuse, sont revêtus d'un enduit vert d'hydrocarbonate, et il arrive souvent que leurs faces soient corrodées ou creuses.

La *Chalcotrichite*, ainsi nommée parce qu'elle se présente en filaments capillaires (τρίχιον, petit poil), d'un rouge cochenille ou carmin, est encore de l'oxydule Cu^2O, de P. S. = 5,8. Kenngott l'avait séparée de la cuprite parce qu'elle lui avait semblé appartenir au système rhombique. MM. Knop, Fischer et Zirkel ont constaté que les fibres, toujours monoréfringentes, sont formées par des cubes très allongés dans une seule direction.

La **Mélaconise** (μέλας, noir, et κόνις, poussière) est un oxyde noir CuO ou Cu^2O^2, d'apparence cubique tétraédrique, gris d'acier foncé ou noir, qui présente les réactions de la cuprite. — P. S. = 5,95 à 6,25. — D. = 3,00. D'après M. Maskelyne, cette espèce serait réellement monoclinique.

La **Ténorite** du Vésuve est encore un protoxyde, en lamelles hexagonales, grises ou noires, monocliniques suivant M. Scacchi, tricliniques selon M. Kalkowsky.

D'après M. Jenzsch, l'oxyde artificiel CuO est rhombique, avec clivage *p* parfait et P. S. = 6,55. Ainsi le protoxyde de cuivre serait trimorphe.

CARBONATES

Le cuivre ne forme pas de carbonates anhydres. On a bien décrit à ce titre, sous le nom de *Mysorine*, une substance d'ailleurs fort rare, trouvée dans le pays de Mysore (Hindoustan). Mais M. F. R. Mallet a montré qu'il s'agissait d'une malachite impure, renfermant 9 % d'eau.

Il existe deux hydrocarbonates cuivreux, peu différents par leur composition, mais se distinguant nettement par leurs couleurs, la Malachite et l'Azurite.

Malachite. $H^2Cu^2CO^5$. — P. S. = 3,7 à 4,1. — D. = 3,5 à 4.

S. monoclinique. R. A. = 0,880 : 1 : 0,404 (1); mm = 104°20′; ph^1 = 118°10′; a^1h^1 = 90°15′.

Combinaisons : mh^1p; mh^1g^1p avec a^{3}, etc., en petits cristaux allongés, souvent maclés suivant h^1. Clivages : p parfait; g^1 moins parfait.

Cassure conchoïdale ou inégale. Éclat vitreux, nacré sur p. Vert émeraude,

(1) Mallard adopte R. A. = 0,782 : 1 : 0,404, ce qui, sans changer la valeur de mm, transforme p en o^1 et donne, pour le nouveau ph^1, 90°3′.

vert d'herbe, vert-de-gris passant au vert pomme. Poussière vert-de-gris. **Fragile.**

Biréfringence énergique. Signe opt. négatif. ρ > v. A. O. dans g^1. Biss. inclinée sur p de 85°20'. $2V = 44°,1$; $2E = 89°,1$. $n_m = 1,87$ (rouge).

Ch. Décrépite et noircit; réact. 18, 23. Fusible sur le charbon en un globule de cuivre; soluble avec effervescence dans les acides; soluble dans l'ammoniaque.

Se présente en cristaux très petits, mais surtout en aiguilles radiées à éclat soyeux et en masses mamelonnées, concrétionnées, dont les couches successives produisent, après polissage, de beaux effets d'ornement.

La malachite, qui renferme jusqu'à 72 % de protoxyde de cuivre, avec 8 % d'eau, occupe la partie supérieure des gîtes de chalcopyrite. On en trouve, en Oural, des masses pesant plusieurs quintaux.

Etym. : μάλαχη, mauve.

Azurite ou **Chessylite**. $H^2Cu^3C^2O^8$. — P. S. = 3,7 à 3,8. — D. = 3,5 à 4.

S. monoclinique. R. A. = 0,850 : 1 : 1,761 ; $mm = 99°20'$ (1) ; $ph^1 = 92°24'$; $d^1/_2d^1/_2 = 106°3'$ sur h^1 ; $pd^1/_2 = 111°50'$; $md^1/_2 = 160°2'$; $mh^1 = 139°40'$.

Combinaisons : $pmd^1/_2$ (fig. 618) ; la même avec e^3 ($pe^3 = 149°36'$) ; la même avec h^1, a^2 et b^1 ; etc. Cristaux souvent allongés suivant l'orthodiagonale ou aplatis parallèlement à la base p, d'ordinaire très développée. Clivage parfait e^1 ($e^1e^1 = 59°12'$). Cassure conchoïdale. Fragile.

Biréfringence énergique, positive. $\rho > v$. Dispersion horizontale. A. O. dans un plan parallèle à l'orthodiagonale ; Biss. dans g^1, faisant un angle de 12°36' avec mm et de — 75° avec pg^1. $2H = 82°$; $2E = 151°$.

Caractères chimiques de la malachite. Renferme 69 %. CuO et 5 %. H^2O.

L'Azurite (*Cuivre carbonaté bleu*), ainsi nommée à cause de sa couleur, variable du bleu d'azur au bleu de Prusse (avec poussière d'un bleu plus pâle), a reçu le nom de **Chessylite**, à cause des magnifiques cristaux de cette substance, fournis autrefois par la partie supérieure du gîte de pyrites de Chessy, près de Lyon. On la trouve aussi au Boléo (Basse-Californie).

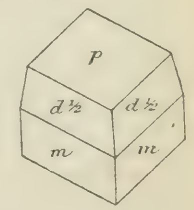


Fig. 618.

A cause des significations diverses que le nom d'Azurite a reçues (on l'applique souvent à l'Outremer, parfois à la Klaprothine), il est préférable de s'en tenir, pour le carbonate bleu de cuivre, à la désignation de Chessylite.

L'Aurichalcite (d'*aurichalcum*, nom du laiton, employé du temps de Pline) est un hydrocarbonate de cuivre et de zinc, mais habituellement associé aux minerais cuivreux et exploité comme tel. Il contient 46. ZnO ; 28. CuO ; 16. CO^2 ;

(1) Plusieurs auteurs indiquent 99°32'. La face $d^1/_2$ est notée $d^1/_4$ par Des Cloizeaux.

10. H^2O, et se présente en cristaux aciculaires vert pâle ou vert-de-gris, de forme indéterminée.

Delesse a dédié à Burat, sous le nom de *Buratite*, une aurichalcite calcifère, d'un vert pomme ou d'un bleu clair, contenant de 2 à 9 % de chaux et formant des agrégats fibreux de P. S. = 3,02.

SULFATES

Le sulfate anhydre de cuivre n'a été observé qu'au Vésuve. Il y forme deux espèces : l'une, verte ou brune, $CuSO^4$, très malheureusement nommée **Hydrocyanite** et offrant une forme prismatique avec angles voisins de ceux de l'Anglésite; la seconde est la **Dolérophanite**, Cu^2SO^5, de M. Scacchi, en petits cristaux bruns monocliniques, qui bleuissent dans l'eau avant de se dissoudre.

Cyanose. $H^{10}CuSO^9$. — P. S. = 2,2 à 2,3. — D. = 2,5.

S. triclinique: R. A. = 0,566 : 1 : 0,550; $zy = 97°39'$; $zx = 106°49'$; $xy = 77°37'$; $mt = 123°10'$; $tp = 127°40'$; $pm = 109°32'$; $h^1g^1 = 100°41'$.

Combinaison : $pmth^1g^1a^1$ avec les facettes $\{f^1c^1{}_{3}g^1\}$, ${}^3h$, etc. Clivages très imparfaits m et t : stries sur m, t et g^1 parallèlement à mt.

Éclat vitreux. Translucide. Bleu de Prusse. Poussière incolore.

Signe opt. négatif. $\rho < v$. $n_g = 1,523$; n_m 1,516; $n_p = 1,492$. Biss. faisant des angles de 72°52′ avec $b^1/_2$, de 81°31′ avec t, de 43°41′ avec m. Plan A. O. coupant le cercle de zone tp à 75°48′ de t. 2V = 56°; 2E = 93°.

Saveur métallique désagréable.

Ch. Réact. 23, 127. Soluble en bleu dans l'eau.

La Cyanose ou *Couperose bleue* se rencontre dans les galeries des mines de cuivre ainsi qu'au Vésuve.

Étym. : κύανος, bleu. M. Dana préfère (et beaucoup d'auteurs avec lui) le nom de **Chalcanthite**, donné par M. de Kobell, à cause de l'ancienneté du nom de *chalcanthum*, appliqué au vitriol.

Brochantite. $H^6Cu^4SO^{16}$. — P. S. = 3,8 à 3,9. — D. = 3,5 à 4.

S. rhombique : R. A. = 0,780 : 1 : 0,484; $mm = 104°32'$; $g^1e^1 = 103°42'$; $e^1e^1 = 152°37'$ (1).

Combinaison $mg^1e^1a^1$, avec aplatissement suivant g^1. Clivage g^1 parfait. Petits cristaux et masses cristallines d'un beau vert émeraude. Poussière vert clair.

Opt. — Signe négatif. $\rho < v$. A. O. dans h^1; Biss. normale à g^1. 2H = 95°,1.

L'espèce est insoluble dans l'eau, mais attaquable par les acides et soluble dans l'ammoniaque.

(1) Quelques minéralogistes prennent g^1 pour p et m pour $e^1/_4$. Alors $mm = 114°29'$.

Etym. : Dédiée à Brochant de Villiers.

Il existe encore d'autres sulfates hydratés de cuivre. Nous citerons :

La **Langite** de Cornouailles, qui contient 2 équivalents d'eau de plus que la Brochantite et qui cristallise en petits cristaux d'un bleu verdâtre, à symétrie rhombique (R. A. = 0,535 : 1 : 0,339 ; mm = 123°44'. A. O. dans g^1. — P. S. = 3,5. — D. = 2,5).

La **Pisanite**, $H^{14}(Cu,Fe)SO^{11}$, contenant jusqu'à 11 % de fer et monoclinique (mm = 83°33' ; pm = 100°10' ; ph^1 = 105°22').

La **Lettsomite** ou **Cyanotrichite**, sulfate de cuivre et d'alumine, en cristaux capillaires bleu de smalt, d'aspect velouté, polychroïques, à symétrie rhombique.

PHOSPHATES, ARSÉNIATES, VANADATE

Libethénite. $H^2Cu^4P^2O^{10}$. — P. S. = 3,6 à 3,8 — D. = 4.

S. rhombique ; R. A. = 0,960 : 1 : 0,702 ; mm = 92°20' ; e^1e^1 = 109°52'. Clivages imparfaits g^1 et h^1.

Petits cristaux $me^1b^{1/2}$ ou masses concrétionnées, d'un vert sombre, avec poussière vert d'herbe, dans les cavités du quartz à Libethen (Hongrie). Éclat gras. Fragile. Signe opt. négatif. A. O. dans p ; Biss. normale à g^1 ; $\rho > v$; 2V = 81°, 1 ; 2H = 101°, 1 ; n_m = 1,743 (D).

Soluble dans les acides et dans l'ammoniaque. Réact. 18, 23, 60, 76.

La Libethénite est isomorphe avec l'Adamine ainsi qu'avec l'Olivénite.

Lunnite. $H^6Cu^6P^2O^{14}$. — P. S. = 4 à 4,4. — D. = 4,5 à 5.

S. monoclinique ; R. A. = 2,825 : 1 : 1,534 ; mm = 38°59' ; ph^1 = 91° (1).

Cristaux mh^1pa^1 avec $\{b^1b^1/_3h^1\}$, de petite taille, ou masses concrétionnées, d'un vif éclat vitreux, d'un vert émeraude foncé passant au vert-de-gris, avec poussière d'un beau vert.

Biréfringence énergique. Signe opt. négatif. A. O. dans un plan parallèle à ph^1. Biss. inclinée de — 21°,5 sur mm. 2E = 95°. $\rho < v$.

Soluble dans l'acide nitrique et l'ammoniaque. Au chalumeau, décrépite et donne une poudre noire.

Etym. : Dédiée au chimiste Lunn. Mais avant que ce dernier en eût fait l'analyse, l'espèce avait reçu d'Hausmann, en 1818, le nom de *Pseudomalachite*. On la désigne aussi sous le nom de *Phosphorochalcite*.

(1) Il règne un certain désaccord entre les auteurs au sujet de la Lunnite. M. Schrauf, en acceptant le rapport d'axes ci-dessus indiqué, regarde l'espèce comme triclinique, avec xy = 90°39' et xz = 89°29'. D'autres ont fait de la Lunnite une espèce rhombique, avec mm = 109°28' et pa^1 = 146°18'. Des Cloizeaux admet R. A. = 2,988 : 1 : 0,667, avec mm = 38°56' et ph' = 103°26'.

On connaît plusieurs arséniates hydratés de cuivre. Les principaux sont les suivants :

Olivénite. $H^2Cu^4As^2O^{10}$. — P. S. = 4,2 à 4,6. — D. = 3.

S. rhombique (isomorphe avec Adamine et Libethénite); R. A. = 0,957 : 1 : 0,670; $mm = 92°30'$; $e^1e^1 = 109°2'$ adj.

Combinaison usuelle me^1h^1, parfois avec g^1 et a^1.

Vif éclat vitreux; vert olive ou vert poireau plus ou moins foncé, avec poussière vert olive clair. Signe opt. positif; $\rho < v$; A. O. dans p; Biss. normale à h^1. $2H = 105°,5$ (rouge).

Ch. Fond et colore la flamme en bleu verdâtre; cristallise en aiguilles par le refroidissement. Sur le charbon, dégage des fumées arsenicales et, avec la soude, donne un globule de cuivre. Soluble en bleu dans les acides et l'ammoniaque.

Étym. : Le nom dérive de la couleur olivâtre.

Euchroïte. $H^{14}Cu^4As^2O^{16}$. — P. S. = 3,3 à 3,4. — D. = 3,5 à 4.

S. rhombique. R. A. = 0,609 : 1 : 1,038 ; $mm = 117°20'$. L'espèce est d'une jolie couleur vert émeraude, en petits cristaux pmg^3e^1.

Aphanèse. $H^6Cu^6As^2O^{14}$. — P. S. = 4,3 à 4,4. — D. = 2,5 à 3.

S. monoclinique ; R. A. = 1,907 : 1 : 3,851 ; $mm = 56°$; $ph^1 = 99°30'$. Cristaux $mh^1pa^{2/3}$, avec $pa^{2/3} = 99°30'$. Clivage p parfait. Vert bleuâtre. Signe opt. négatif; A. O. dans g^1; $\rho < v$. Biss. presque normale à p. $2E = 134°$ (vert).

L'**Erinite**, $H^4Cu^5As^2O^{12}$ (P. S. = 4 à 4,1. — D. = 5), se présente en masses concrétionnées d'un vert émeraude, tandis que la **Chalcophyllite**, de la même couleur, et un peu aluminifère (2 à 6 %), est en rhomboèdres de 69°48' (R. A. = 1 : 2,554), avec clivage a^1 parfait. Aussi l'espèce forme-t-elle des paillettes, d'où son nom. — P. S. = 2,3 à 2,6. — D. = 2. Signe opt. négatif.

Citons encore un arséniate aluminifère hydraté, la **Liroconite**, de formule incertaine, généralement phosphoreuse, bleu de ciel ou vert poireau. P. S. = 2,8 à 2,9. — D. = 2 à 2,5. S. monoclinique; R. A. = 1,681 : 1 : 1,319; $mm = 61°31'$; $ph^1 = 91°27'$; $e^1e^1 = 74°21'$. (Plusieurs auteurs permutent m avec e^1).

Cristaux me^1. Signe opt. négatif; A. O. dans un plan normal à g^1; Biss. inclinée de 25° sur pg^1; $2E = 135°$ (rouge). Cette espèce, en jolis petits cristaux, ayant l'apparence d'octaèdres aplatis, à éclat vitreux, presque résineux, accompagne les minerais de cuivre en Cornouailles et en Hongrie.

Ch. Dans le matras, donne beaucoup d'eau et devient vert olive. Au chalu-

meau, se fendille sans décrépiter. Sur le charbon, réactions de l'arsenic et du cuivre. Soluble dans l'acide azotique et l'ammoniaque.

Étym. : λείρος, pâle, et κόνις, poussière.

La **Volborthite**. $H^2(Cu,Ca)V^2O^{10}$, est un vanadate hydraté de cuivre, de baryte et de chaux, trouvé en Russie sous la forme de petites tables hexagonales d'un vert olive ou d'un jaune citron. — P. S. = 3 à 3,55. — D. = 3. — Après fusion avec le carbonate de soude sur une cuiller en platine, la Volborthite, additionnée d'acide chlorhydrique et portée à l'ébullition, fournit une liqueur vert émeraude, qui devient bleue quand on l'étend d'eau.

Étym. : Dédiée à M. Volborth, auteur de la découverte.

Lorsque la proportion de chaux atteint 12 %, il en résulte une nouvelle espèce, la *Calciovolborthite*.

SILICATES

Dioptase. H^2CuSiO^4. — P. S. = 3,27 à 3,35. — D. = 5.

S. rhomboédrique. R. A. = 1 : 1,056; $pp = 95°55'$; $b^1b^1 = 122°24'$ sur arêtes culm.; $pd^1 = 132°3'$ adj. (1).

Combinaisons : d^1p; $d^1pe^{1/2}$; d^1p avec a^3, cette dernière forme réduite à moitié (fig. 619) et accusant un polyèdre hémiaxe centré ($d^1d^3 = 151^0$); etc. Clivage b^1 parfait. Faces p striées suivant pd^3; faces d^1 striées suivant pd^1.

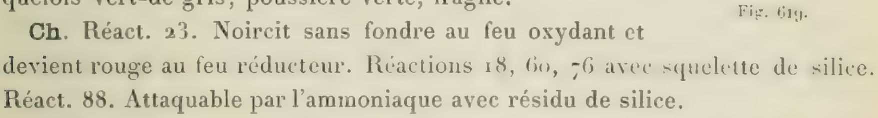
Biréfringence énergique, positive; $n_o = 1,667$ (vert); $n_e = 1,724$.

Anomalies optiques indiquant une symétrie rhombique.

Éclat vitreux; couleur d'un beau vert émeraude, quelquefois vert-de-gris; poussière verte, fragile.

Fig. 619.

Ch. Réact. 23. Noircit sans fondre au feu oxydant et



devient rouge au feu réducteur. Réactions 18, 60, 76 avec squelette de silice. Réact. 88. Attaquable par l'ammoniaque avec résidu de silice.

Provient d'un calcaire de la Sibérie, dans un contrefort de l'Altaï. Également recueilli au Congo français.

Étym. : διά, à travers, et ὀπτάζω, voir, parce qu'on aperçoit au travers les plans de clivage.

Chrysocolle. H^4CuSiO^5. — P. S. = 2 à 2,3. — D. = 2 à 3.

Amorphe. Masses compactes ou concrétionnées, à éclat vitreux ou résineux, d'un vert bleuâtre souvent mélangé de brun. Réact. 89. Les autres caractères chimiques semblables à ceux du dioptase.

(1) Quelques auteurs donnent à p la notation b^1 et réciproquement, prenant d'ailleurs $b^1b^1 = 95°28'$, $pp = 125°54'$ et R. A. = 1 : 0,528.

Étym. : Le nom signifie *colle d'or* et, selon Pline, vient de la ressemblance du minéral avec une substance autrefois employée à souder l'or.

MINERAIS HALOIDES

CHLORURE, OXYCHLORURES

Le chlorure, Cu^2Cl^2, a été signalé, sous le nom de **Nantokite**, à Nantoko (Chili), où il forme des masses incolores, d'aspect analogue à celui de la céruse, clivables avec une égale facilité suivant trois directions rectangulaires, et cependant biréfringentes. — P. S. = 3,93. — D. = 2 à 2,5. S'oxyde à l'air; colore la flamme en bleu. Soluble dans les acides et dans l'ammoniaque.

Atacamite. $H^3Cu^2Cl\,O^3$. — P. S. = 3,6 à 3,76. — D. = 3 à 3,5.

S. rhombique; R. A. = 0,661 : 1 : 0,751 ; $mm = 113^\circ 3'$; e^1e^1 sur $p = 106^\circ 9'$ (1).

Combinaison fréquente me^1g^1, avec la zone verticale striée par l'apparition des facettes g^2, g^3, etc. Clivage g^1 parfait.

Petits cristaux et masses cristallines ou terreuses d'un beau vert émeraude, avec poussière vert pomme, éclat adamantin ou vitreux.

Signe opt. négatif. A. O. dans h^1. Biss. normale à g^1. $2H = 92^\circ$ à 94° (rouge); $\rho < v$.

Ch. Réact. 13. Sur le charbon, fond en donnant à la fois un sublimé brun et un autre grisâtre, ainsi qu'un globule de cuivre. Soluble dans les acides et dans l'ammoniaque.

Trouvée dans le désert d'Atacama (Bolivie).

La **Boléite**, du Boleo, $Pb\,Cl^2 + CuO.\,H^2O + \frac{1}{3}\,Ag\,Cl$ (P. S. = 5,08. — D. = 3), se présente en cubes d'un beau bleu foncé. Quelques-uns de ces cubes portent des faces a^1 très nettes et brillantes; d'autres, plus rares, montrent de petites facettes b^1. Clivage p; moins net suivant a^1.

La **Cumengéite** (dédiée à M. Cumenge) diffère de la Boléite en ce qu'elle est dépourvue de chlorure d'argent. Cette substance (P. S. = 4,71) cristallise en octaèdres quadratiques (R. A. = 1 : 3,294 ; $pa^2 = 121^\circ 16'$). Elle est de signe négatif ; $n_g = 2,026$.

D'après M. Lacroix (2), la Boléite est pseudo-cubique, chaque cube étant constitué par le groupement autour du centre de six pyramides quadratiques qui ont respectivement pour bases les faces du cube.

La *Pseudoboléite* est une variété intermédiaire entre la Boléite et la Cumen-

(1) Quelques auteurs ont admis $mm = 112^\circ 20'$ et $e^1e^1 = 105^\circ 40'$. — (2) *Bulletin du Muséum d'Histoire naturelle*, 1875, n° 2.

géite; tandis que la *Percylite*, plus riche en argent, serait plus monoréfringente et de densité plus forte.

Ces divers types forment ensemble des groupements dont le plus fréquent est constitué par six octaèdres de Cumengéite s'appliquant respectivement sur chacune des faces d'un cube de Boléite.

MINERAIS DE MERCURE

MERCURE NATIF

Mercure. Hg. — P. S. = 13,5 à 13,6.

Le Mercure, liquide à la température ordinaire, se solidifie à — 40° et cristallise alors dans le système cubique. D'un blanc d'étain, il bout à + 357°. Souvent il contient un peu d'argent.

On le trouve en gouttelettes dans les gisements de cinabre.

SULFURES, SÉLÉNIURE, TELLURURE

Cinabre. Hg S. — P. S. = 8 à 8,2. — D. = 2 à 2,5.

S. rhomboédrique; R. A. = 1 : 2,29; $pp = 71°48'$ (1).

Combinaisons : $pa^1\ e^2\ a^5/_2$ (fig. 620); $pa^1\ e^2\ a^3$; on observe encore b^1, a^2, a^4, etc. $pa^1 = 110°43'$. Macles suivant a^1.

Clivage e^2 assez parfait. Cassure inégale et esquilleuse. Couleur rouge cochenille, avec tendance au gris bleuâtre ou à l'écarlate. Éclat adamantin.

Biréfringence très énergique, positive. $n_o = 2,854$ (rouge); $n_e = 3,201$.

D'après Des Cloizeaux, le cinabre possède un pouvoir rotatoire considérable, égal à 15 fois celui du quartz. Cela suffit pour faire admettre une hémiédrie holoaxe. De plus, M. d'Achiardi a constaté sur un cristal de Ripa, près de Serravezza, des facettes prismatiques et scalénoédriques réduites à la moitié de leur nombre et disposées comme l'exige le genre d'hémiédrie en question. Mais ce fait est le seul connu jusqu'ici.

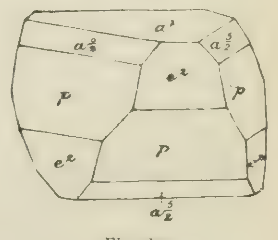


Fig. 620.

Le cinabre se laisse entamer au couteau. Il s'électrise par frottement.

Ch. Volatil; donne dans le tube fermé un sublimé noirâtre et, dans le tube ouvert, un mélange de sublimé et de gouttelettes de mercure, avec dégagement d'acide sulfureux. Réact. 45. Complètement soluble dans l'eau régale.

(1) M. Zirkel admet R. A. = 1 : 1,145 et $pp = 92°37'$, tandis que le rhomboèdre de 71°48', qui reste le plus développé, prend la notation $e^5/_2$.

Étym. : κιννάβαρις, nom usité dès le temps de Théophraste. Vitruve et Pline l'appelaient *minium*.

Un sulfure de mercure noir, comme celui qui se produit dans les laboratoires par l'union directe du mercure et du soufre (et qui devient rouge par sublimation), a été recueilli en Californie. Son poids spécifique n'est que 7,7. On l'a nommé **Métacinnabarite**.

Le sélénium, en s'unissant au mercure, produit la **Tiemannite** (découverte au Hartz par M. Tiemann, et dont l'analyse indique Hg^6Se^5 ou $Hg^{11}Se^{10}$ plutôt que HgSe). C'est une substance massive, d'un gris d'acier, sans clivages. — P. S. = 7,1 à 7,37. — D. = 2,5.

Un tellurure de mercure, Hg Te, gris noirâtre, a été trouvé dans le Colorado. M. Genth lui a donné le nom de **Coloradoïte**. — P. S. = 8,63. — D. = 3.

CHLORURES

Calomel Hg^2Cl^2. — P. S. = 6,4 à 6,5. — D. = 1 à 2.

S. quadratique ; R. A. = 1 : 1,741 ; $b^1/_2 b^1/_2$ = 135°50′ sur *m*.

Cristaux prismatiques très petits *m* ou h^1, parfois terminés par une pyramide très aiguë, où les angles dièdres des arêtes culminantes sont de 98°8′. Clivage h^1.

Blanc gris, brun. Éclat adamantin. Signe opt. positif ; n_o = 1,96 (rouge) ; n_e = 2,60.

Ch. Dans le matras, se volatilise sans fondre en sublimé blanc. Réact. 45. Insoluble dans l'eau.

La **Coccinite** rouge du Mexique, d'abord décrite comme iodure de mercure, paraît n'être qu'un chlorure différent du calomel.

MINERAIS D'ARGENT

ARGENT NATIF

Argent. Ag. — P. S. = 10 à 11. — D. = 2,5 à 3.

S. cubique. Combinaisons : *p* ; a^1 ; b^1, parfois b^3 ; pa^1 ; pb^2, etc. Macles fréquentes, notamment par hémitropie normale à a^1. Très souvent en filaments capillaires ou en fibres étirées, en rameaux divergents, simulant des fougères, aussi en plaques minces et courbes. Blanc d'argent tirant sur le jaune, quelquefois coloré en brun, noir, ou rouge de cuivre. Pas de clivages. Ductile. Le meilleur des conducteurs de l'électricité. Facilement fusible ; soluble dans l'acide sulfurique. Souvent mélangé d'or, cuivre, fer, arsenic, etc., et presque toujours de mercure.

Se rencontre dans beaucoup de filons argentifères, ainsi que dans les amygdaloïdes du Lac Supérieur, où il est associé au cuivre. Les plus beaux cristaux viennent de Kongsberg en Norvège.

MINERAIS NON OXYDÉS

Amalgame ou **Mercure argental**. Ag^2Hg^2 ou Ag^2Hg^3. — P. S. = 13,7 à 14,1. — D = 3 à 3,5.

S. cubique. Beaux cristaux dodécaédriques, très analogues à ceux du grenat (fig. 621), formés des faces b^1, a^2 et de l'hexotaèdre $\{ b^1 b^1/_2 b^1/_3 \}$; quelquefois p, a^1, b^3. Traces d'un clivage b^1.

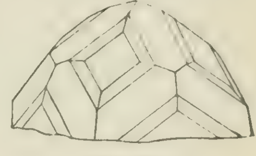


Fig. 621.

Cassure conchoïdale. Frotté sur du cuivre, le blanchit. Dans le matras, dégage du mercure en laissant de l'argent spongieux. Soluble dans l'acide azotique.

Accompagne le cinabre à Almaden et au Chili.

L'**Arquérite** (d'Arqueros, Chili) est un autre amalgame $Ag^{12}Hg$, en octaèdres réguliers et en masses ayant les caractères de l'argent, mais plus tendres. — P. S. = 10,8. — D. = 2 à 2,5.

SULFURES, SÉLÉNIURES, TELLURURES, ANTIMONIURE

Argyrite, **Argyrose** ou **Argentite**. Ag^2S. — P. S. = 7,2 à 7,4. — D. = 2 à 2,5. S. cubique.

L'Argyrite ou *Argent sulfuré* se présente en cristaux p, a^1, pa^1, b^1, b^1a^2, souvent déformés par allongement; macles amenant à Freiberg la pénétration mutuelle de deux cubes, comme pour la fluorine.

L'Argyrite est surtout remarquable par sa grande malléabilité, déjà mentionnée par Agricola. Elle se laisse couper en copeaux. Sa couleur est le gris de plomb noirâtre, tendant souvent au brun ou au noir, avec peu d'éclat.

Sur le charbon, fond, bouillonne et donne un globule d'argent. Soluble dans l'acide azotique avec dépôt de soufre.

L'Argyrite, contenant 87 % d'argent, constitue un excellent minerai de ce métal. On la trouve au Pérou, au Chili, au Mexique, et elle abonde dans le célèbre filon dit *Comstock lode*, au Nevada.

Étym. : ἄργυρος, argent.

L'**Acanthite** de Freiberg est aussi un sulfure Ag^2S, mais rhombique (R. A. = 0,689 : 1 : 0,994; $mm = 110°54'$; $b^1/_2 b^1/_2 = 88°38'$ culm. et 120°58' lat.). Cette espèce, d'un gris bleu noirâtre, tendre et ductile (P. S. = 7,2 à 7,3), peut être considérée comme isomorphe avec la Chalcosine.

Cet isomorphisme est encore mieux réalisé par la **Stromeyérite** $(Cu,Ag)^2 S$, rhombique (R. A. = 0,582 : 1 : 0,921). — P. S. = 5,2 à 6,3. — D. = 2,5 à 3. Il y a d'ordinaire 53 % d'argent contre 31 de cuivre.

La **Jalpaïte**, de Jalpa (Mexique), encore plus riche en argent (elle en renferme 71,75 %), est cubique. — P. S. = 6,9. — D. = 2,5.

La **Sternbergite**, $Ag^2Fe^4S^6$, est en petits cristaux brun tombac, tachant le papier, à symétrie rhombique. R. A. = 0,583 : 1 : 0,839; *mm* = 119°30′; $b^1/_2b^1/_2$ = 118° sur *m*; $pb^1/_2$ = 121°. Cristaux tabulaires $pb^1/_2g^1$. Clivage *p* parfait. — P. S. = 4,2. — D. = 1 à 1,5. Fond sur le charbon en globule magnétique recouvert d'argent.

De cette espèce doit être rapprochée l'**Argentopyrite** (*Silberkies*) $Ag^2Fe^6S^{10}$ (P. S. = 6,47. — D. = 3,5 à 4), en cristaux gris rhombiques $pg^1b^1/_2e^1/_2$, avec *mm* = 119°40′ (R. A. = 0,581 : 1 : 0,825). Un autre sulfure de fer et d'argent, également rhombique, est la **Frieséite**, $Ag^2Fe^5S^8$. — P. S. = 4,22. — D. = 1,5. R. A. = 1,597 : 1 : 2,735.

La **Naumannite** est un séléniure d'argent, Ag^2Se (P. S. = 8. — D. = 2,5), dont les clivages cubiques affirment l'isomorphisme avec l'Argyrite. Un autre séléniure, de forme cristalline inconnue, est l'**Eucaïrite**, AgCuSe.

La **Hessite** (dédiée à M. Hess) est un tellurure, Ag^3Te, gris, sectile. P. S. = 8,31 à 8,79. — D. = 2,5 à 3. De gros cristaux, trouvés en Transylvanie, ont offert une symétrie cubique avec les formes *p*, b^1, a^1, b^2, b^3, a^2, $a^1/_2$ (1).

La **Petzite** en est une variété aurifère, qui renferme jusqu'à 25 % d'or et dont le poids spécifique peut s'élever jusqu'à 9.

Dyscrase. Ag^2Sb. = 9,4 à 10. — D. = 3,5.

S. rhombique (isomorphe avec la Chalcosine); R. A. = 0,578 : 1 : 0,672; *mm* = 119°59′; $b^1/_2b^1/_2$ = 132°42′ et 92°. Combinaisons : mg^1p; la même avec $b^1/_2$ et $e^1/_2$. Clivage *p* et e^1 parfaits; *m* imparfait. Cassure inégale.

Se trouve en cristaux blanc d'argent ou d'étain et en masses grenues. Réact. 33. Soluble avec résidu blanc dans l'acide azotique.

La composition chimique est variable; la proportion d'argent oscille entre 72 et 84 %, sans doute en raison du mélange avec l'argent natif.

Étym. : δύς, mauvais, et κρᾶσις, alliage. C'est l'*Argent antimonial*.

ANTIMONIOSULFURES, ARSÉNIOSULFURES

L'argent forme, avec le soufre, l'arsenic et l'antimoine, divers composés constituant une série analogue à celle des cuivres gris. Cette série, dite en

(1) Il est vrai que M. Becke considère cette symétrie cubique comme apparente et comme la limite d'une symétrie triclinique où R. A. = 1,02 : 1 : 1,03, les trois angles des axes étant à peine différents de 90°.

Allemagne la série des *Gültigerze* ou *Giltigerze* (c'est-à-dire des minerais *riches*), comprend deux divisions : les minerais noirs, ou *Argents noirs* des mineurs, et les minerais rouges, ou *Argents rouges*.

ARGENTS NOIRS

Polybasite. Ag^5SbS^6 ou plus exactement $(Sb,As)^2S^3 + 8$ ou $9\ (Ag,Cu)^2S$. — P. S. = 6 à 6,2. — D. = 2 à 2,5.

S. rhombique ; R. A. = 0,577 : 1 : 0,408 ; mm = 120° ; $b^1/_2b^1/_2$ culm. = 129°32′ ; $pb^1/_2$ = 121°30′ (1).

Les cristaux (autrefois considérés comme hexagonaux, avec b^1b^1 = 117°) sont minces, tabulaires, ordinairement composés de $mpb^1/_2$. Clivage p imparfait.

Noir de fer, poussière noire ; rouge en lames très minces. Signe opt. négatif. A. O. dans h^1. Biss. normale à p ; 2E = 62° à 88°.

Ch. Décrépite, fond facilement et donne avec la soude un bouton d'argent cuprifère. Réact. 30, 33.

La Polybasite, qui contient 64 à 72 % d'argent, avec 3 à 10 de cuivre, un peu de fer et de zinc, a été rencontrée à Freiberg, à Przibram, à Schemnitz, au Mexique, au Nevada, etc. Son nom a été choisi par H. Rose à cause du grand nombre des bases métalliques qu'elle contient.

Psaturose ou **Stéphanite**. Ag^5SbS^4. — P. S. = 6,2 à 6,3. — D. = 2 à 2,5.

S. rhombique ; R. A. = 0,629 : 1 : 0,685 ; mm = 115°39′ ; $b^1/_2b^1/_2$ = 104°20′ sur m ; $e^1/_2e^1/_2$ = 107°45′ sur g^1 ; $pb^1/_2$ = 126°6′.

Cristaux d'apparence hexagonale $pb^1/_2e^1/_2$; les mêmes avec m, g^1 et b^1, quelquefois avec $b^1/_4$. Macles fréquentes suivant m, le plus souvent multiples. Clivages imparfaits $e^1/_2$ et g^1.

Noir de fer ; éclat métallique, poussière noire ; cassante.

Ch. Dans le tube fermé, décrépite et fond. Dans le tube ouvert, fumées d'antimoine ; fond sur le charbon en un globule gris foncé, qui donne avec la soude un grain d'argent. Se décompose par l'acide azotique, avec précipitation de soufre et d'oxyde d'antimoine.

La Stéphanite qui, à l'état de pureté, renferme 68,5 % d'argent, est un précieux minerai, abondant surtout (à l'état compact) dans le filon de Comstock (Nevada). On la trouve aussi à Przibram et à Zacatecas (Mexique), où elle est bien cristallisée.

Étym. : *Psaturose* a été dérivé par Beudant de ψαθυρός, fragile, et devrait par

(1) M. Miers (*Mineralogical Magazine*) adopte R. A. = 1,7262 : 1 : 0,6344, avec mm = 119°50′, g^1m = 120°5′ ; pe^1 = 137°36′.

suite s'écrire *Psathurose*. *Stéphanite* rappelle la dédicace de l'espèce, faite par Haidinger à l'archiduc Étienne d'Autriche.

ARGENTS ROUGES

Les argents rouges sont de trois sortes : l'*Argent rouge antimonial* ou *Pyrargyrite* ; l'*Argent rouge arsenical* ou *Proustite* ; enfin la *Miargyrite*, antimoniale et plus pauvre en argent que les deux autres espèces.

Pyrargyrite ou **Argyrythrose**. Ag^3SbS^3. — P. S. = 5,75 à 5,85. — D. = 2 à 2,5.

S. rhomboédrique : R. A. = 1 : 0,788 (1) ; pp = 108°42′ ; b^1b^1 = 137°58′.

Combinaisons : formes prismatiques dominantes, surtout le prisme d^1 ; $pb^1d^1d^2b^3$ (fig. 622) ; $d^1pa^1b^2$; $pb^1d^1e^2$, le prisme e^2 étant réduit à 3 faces ; pd^1d^2 avec un scalénoèdre tel que b^3 sur les arêtes culminantes (fig. 623) ; scalénoèdre aigu $d^4/_3$, couronné par b^1 ou par b^3, etc. Hémimorphisme probable. Macles suivant b^1, a^1 et p, donnant souvent lieu à de minces lamelles hémitropes. Clivage p assez parfait.

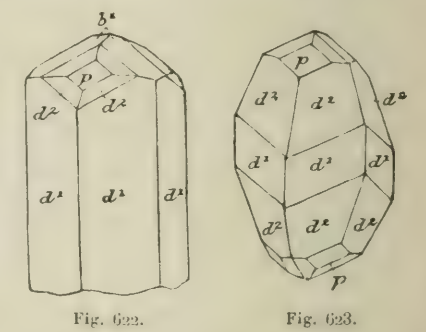


Fig. 622. Fig. 623.

Cassure conchoïdale, parfois inégale. Éclat adamantin. Couleur variant du rouge de kermès au gris de plomb foncé, avec poussière rouge cochenille ou rouge pourpre, très analogue à celle de la kermésite. Cristaux quelquefois transparents.

Biréfringence très énergique, négative n_o = 3,084 (rouge) ; n_e = 2,881.

Ch. Décrépite, fond facilement dans le tube, avec sublimé rouge brun de sulfure d'antimoine. Sur le charbon, Réact. 30, 33, et grain d'argent avec la soude. Attaquable avec dépôt blanc par l'acide azotique.

La Pyrargyrite, qui peut contenir 60 % d'argent, est fréquente dans les filons argentifères, notamment à Andreasberg, Przibram, Schemnitz, Kremnitz, Chanarcillo, ainsi qu'au Mexique et au Nevada.

Étym. : πῦρ, feu, à cause de sa facile fusibilité : c'est le *Dunkles Rothgültigerz* des Allemands.

Proustite. $Ag^6As^2S^6$. — P. S. = 5,5 à 5,6. — D. = 2 à 2,5.

S. rhomboédrique (isomorphe avec la Pyrargyrite) ; R. A. = 1 : 0,8039 ; pp = 107°48′.

(1) M. Miers admet 1 : 0,7892 avec pp = 108°38′.

Mêmes formes que la Pyrargyrite, avec fréquence plus grande des scalénoèdres, tels que d^2 et $d^1{}_3$, associés aux rhomboèdres p, b^1, e^1 et $e^1{}_2$.

Rouge groseille vif; éclat adamantin, transparente; fragile. Poussière d'un rouge vermillon, presque identique avec celle du cinabre. Signe opt. négatif. $n_g = 2{,}979$ (rouge); $n_p = 2{,}714$.

Ch. Dans le tube fermé, donne un peu de sublimé brun de sulfure d'arsenic. Facilement fusible, en un globule métallique cassant, malaisé à réduire en grain d'argent. Décomposable par l'acide azotique avec dépôt de soufre et d'acide arsénieux. Une dissolution de potasse enlève le sulfure d'arsenic, que les acides précipitent en jaune citron.

La Proustite ou *argent rouge clair* (*lichtes Rothgültigerz*) et *arsenical*, qui contient environ 65 % d'argent, accompagne souvent la Pyrargyrite; mais souvent aussi elle en est indépendante, se trouvant associée à des minerais arsenicaux. A Chanarcillo (Chili) on a rencontré, à l'état de filons dans un calcaire, de la Proustite en cristaux scalénoédriques atteignant 7 centimètres de longueur.

Étym. : Dédiée au chimiste J.-L. Proust.

Miargyrite. $Ag^2Sb^2S^4$. — P. S. = 5,18 à 5,25. — D. = 2 à 2,5.

S. monoclinique; R. A. = 0,998 : 1 : 2,91 ; $ph^1 = 98°24'$; $pb^1/_2 = 109°16'$; $h^1o^3 = 129°50'$ (1).

Petits cristaux d'un gris d'acier, $ph^1o^3b^1/_2$, avec $\{d^1d^1/_3h^1/_2\}$.

Poussière rouge cerise; en lames très minces, couleur rouge sang.

Dans le tube bouché, décrépite et fond facilement, en donnant un sublimé de sulfure d'antimoine. Sur le charbon, fond avec fumées d'antimoine et odeur sulfureuse, en laissant un globule d'argent avec traces de cuivre. Décomposée par l'acide azotique avec dépôt d'acide antimonique.

Étym. : μείων, moins, parce que, ne renfermant que 36 % d'argent, elle est moins riche que les autres argents rouges.

MINERAIS OXYDÉS

On a décrit, sous le nom de *Carbonate d'argent* ou *Selbite*, des minerais argentifères où l'analyse avait montré une certaine proportion d'acide carbonique. Mais il a été reconnu que c'étaient des mélanges et, jusqu'ici, on ne connaît authentiquement aucun minerai oxydé d'argent.

(1) Weisbach admet R. A. = 1,005 : 1 : 1,297, ce qui, laissant p intact, transforme o^3 en h^1.

MINERAIS HALOIDES

CHLORURE, BROMURE, CHLOROBROMURE, IODURE

Cérargyrite. AgCl. — P. S. = 5,6. — D. = 1 à 1,5. — S. cubique.

La Cérargyrite ou *Cérargyre*, qualifiée aussi d'*argent corné*, se présente en masses compactes ou en petits cristaux cubo-octaédriques, parfois avec b^1, a^2 et $a^1/_2$, d'un aspect cireux et, le plus souvent, d'un gris de perle, quelquefois verdâtre ou brunâtre, devenant violacés ou gris foncé par l'action de la lumière. Son caractère le plus net est la facilité avec laquelle elle se laisse couper au couteau, comme de la cire. Éclat adamantin. Ind. = 2,061 (Raie D).

Soluble dans l'ammoniaque et fusible à la flamme d'une bougie, elle se réduit sur le charbon en bouton d'argent. Avec le sel de phosphore et l'oxyde de cuivre, elle donne la réaction du chlore.

Étym. : κέρας, corne, à cause de son aspect.

En réalité, ce qu'on appelle communément *Cérargyrite* représente un groupe complexe, où il y a lieu de distinguer : la *Chlorargyrite* AgCl, la *Bromargyrite* AgBr, l'*Embolite* Ag(ClBr) et l'*Iodembolite* ou *Iodobromite* Ag(ClBrI). Ces diverses espèces peuvent former des mélanges isomorphes en proportions très variables.

La **Bromargyrite**, *Bromargyre*, *Bromyrite* ou *Bromite*, est un bromure d'argent, AgBr, cubique ou cubo-octaédrique, en masses cristallines jaunes ou vert olive, accompagnant le Cérargyre au Huelgoat et à Chanarcillo. P. S. = 5,8 à 6. — D. = 1 à 2. Fusible au chalumeau et soluble à chaud dans l'ammoniaque concentrée, elle se laisse couper au couteau comme l'argent corné. Avec le sel de phosphore et l'oxyde de cuivre, colore la flamme en vert bleuâtre.

L'**Embolite** (d'ἐμβόλιον, *intermédiaire* [entre Cérargyrite et Bromargyrite]) est un minéral vert grisâtre ou vert d'asperge, parfois jaunâtre, cubique et sectile comme les espèces précédentes, pouvant offrir les formes p, a^1, b^1, b^2, et formé par un alliage variable de chlorure et de bromure d'argent. — P. S. = 5,8. — D. = 1 à 1,5.

Iodargyrite. AgI. — P. S. = 5,71. — D. = 1.5.

S. hexagonal : R. A. = 1 : 0,814. Cristaux mpb^1, quelquefois avec $b^1/_2, b^1/_4$; $mb^1/_2$ = 152°; $b^1/_2 b^1/_2$ sur m = 124°. Clivage p parfait.

L'Iodargyrite ou *Iodargyre*, tendre et flexible, d'un beau jaune de soufre, quelquefois verdâtre ou brune, forme des cristaux pyramidés qui offrent à peu près les mêmes angles que la Greenockite. Signe opt. positif.

(1) Prior et Spencer, *Mineral. Magazine*, Londres, 1902.

Décomposée, avec dégagement d'iode, par les acides sulfurique et azotique bouillants, l'iodargyrite prend, dans le tube fermé, une couleur orange foncée, qu'elle perd par refroidissement.

L'Iodargyrite offre diverses particularités physiques d'autant plus intéressantes, que MM. Mallard et Le Chatelier (1) ont réussi à les rattacher à la forme cristalline de l'espèce. D'abord, M. Fizeau avait depuis longtemps constaté que cette substance, quand on la chauffe, au lieu de se dilater, subit une contraction cubique, la dilatation de l'axe horizontal ne compensant pas le raccourcissement de l'axe vertical sénaire. De plus, M. Lehmann a reconnu que l'iodure d'argent fondu prenait, en se solidifiant, la forme cubique au lieu de la forme hexagonale.

MM. Mallard et Le Chatelier se sont assurés que l'iodargyrite, énergiquement biréfringente à la température ordinaire, devient *subitement* uniréfringente à $+146°$, en absorbant, dans cette transformation, 6,8 petites calories par gramme, soit, en grandes calories, $1^c,6$ pour les $234^{gr},8$ que représente le poids moléculaire.

Or si l'on prend le rapport d'axes cristallographiques indiqué par M. de Zepharovich, soit 0,8896 : 1 et qu'on multiplie le premier nombre par $\frac{3}{2}$, on trouve 1,2294 : 1, qui diffère peu, et cela par excès, de 1,2247 : 1, rapport d'un axe ternaire cubique à un axe binaire. Donc la symétrie hexagonale de l'Iodargyrite est voisine de la symétrie cubique et, pour qu'elle l'atteigne, il suffit que l'axe vertical, qui est trop grand, se raccourcisse ; c'est précisément le fait constaté par M. Fizeau, et qui doit apparaître comme une préparation au changement d'état cristallin observé à 146°.

MINERAIS D'OR

OR NATIF

Or. Au. — P. S. — 15 à 19,4 ; 19,37, d'après G. Rose, pour l'or pur. — D. — 2,5 à 3.

S. cubique. Formes habituelles : a^1 et p ; pa^1 ; aussi b^1, b^2, a^2, a^3 et $\{b^1 b^{1/2} b^{1/4}\}$; macles suivant a^1. Faces souvent courbes. Cristaux déformés, ordinairement méconnaissables, excepté dans les variétés argentifères. Souvent en plaques, rognons, pépites ou filaments capillaires. Jaune ; extraordinairement ductile et malléable. Facilement fusible ; attaquable seulement par l'eau régale, qui laisse

(1) *Comptes rendus*, XCVII, juillet 1883.

d'ordinaire un petit dépôt de chlorure d'argent. L'or pur demeure sans altération dans le sel de phosphore et la perle reste transparente, tandis qu'elle se trouble et devient jaune au feu de réduction quand l'or est argentifère.

L'or est presque toujours associé au quartz et souvent mélangé d'une manière intime avec la pyrite, parfois avec des composés de tellure. Mais il est surtout exploité dans les alluvions aurifères, où son inaltérabilité l'a préservé de la destruction, en même temps que sa grande densité en faisait l'objet d'une préparation mécanique naturelle.

L'*Electrum* ou *Or argental* est un or, d'un jaune clair, contenant plus de 20 % d'argent. Dans la *Porpézite*, l'or est allié au palladium. Dans la *Rhodite*, il contient de 34 à 43 % de rhodium.

L'**Auramalgame**, Au^2Hg^3, est un minéral en petits grains blancs ou en prismes jaunâtres, contenant 57 à 60 % de mercure, 38 à 39 d'or et, en Colombie, 5 d'argent. — P. S. = 15,47.

TELLURURES

La **Calavérite** (du district de Calaveras en Californie) est un tellurure d'or $(Au^7,Ag)Te^2$ ou $AuTe^4$, d'ailleurs très rare, en petites masses cristallines d'un jaune de bronze, et contenant environ 3 % d'argent.

Sylvane ou **Sylvanite**. $(Au^4,Ag^3)Te^2$. — P. S. = 7,99 à 8.33. — D. = 1,5 à 2.

S. monoclinique (1) ; R. A. = 1,773 : 1 : 0,889 ; $mm = 94°26'$; $ph^1 = 124°39'$; $pm = 114°39'$.

Combinaisons : pg^1g^3 ; $pmg^1g^3h^1e^1$; la même avec $a^1, d^1/_2$, $\{ d^1b^1/_3g^1/_2 \}$, etc. Macles par accolement, suivant h^1, de deux cristaux à axes parallèles, dont les bases font un angle de 110°42'. Clivages p et g^1. Faces souvent creuses.

La Sylvanite est souvent en cristaux prismatiques ou aciculaires, allongés selon g^1p, étalés parallèlement entre eux sur une même surface plane ou croisés en dendrites sous des angles voisins de 60° et de 120°. L'ensemble affecte l'apparence de caractères orientaux, d'ou le nom de *Tellure graphique*, quelquefois donné à l'espèce.

Couleur intermédiaire entre le gris d'acier et le blanc d'argent, quelquefois bronzée. Éclat métallique prononcé. Sectile.

La Sylvanite contient de 24 à 27 % d'or et de 11 à 13 % d'argent.

Ch. Réact. 9,34 ; abandonne sur le charbon un globule d'or ; quelques variétés donnent les auréoles du plomb et de l'antimoine.

Se trouve sur le quartz, en petites veines dans les porphyres trachytiques de *Transylvanie* (d'où le nom de l'espèce).

(1) L'espece était considérée autrefois comme rhombique, avec $mm = 110°48'$. M. Schrauf admet R. A. = 1,634 : 1 : 1,126, ce qui change p en h^1 et h^1 en a^1.

Krennérite. $(Au^{10}Ag^3)Te^2$. — P. S. — 5,598.

S. rhombique ; R. A. = 0,941 : 1 : 0,504 ; mm = 93°30′ ; $pb^{1/2}$ = 143°38′.

Cristaux prismatiques cannelés $pg^1h^1mg^3h^3a^1e^1$ avec $\{b^1b^{1/3}g^{1/2}\}$. Clivage p parfait ; apparence souvent clinorhombique.

Presque blanc d'argent. Au chalumeau, décrépite violemment.

Ce minéral, primitivement qualifié de *Bunsénine*, se trouve à Nagyag (Transylvanie) avec quartz et pyrite.

Elasmose ou **Nagyagite**. — P. S. = 6,68 à 7,2. — D. = 1 à 1,5.

Ce minéral est constitué de plomb, d'or et cuivre, unis au soufre, à l'antimoine et au tellure, dans des proportions variables, qui n'ont pas permis encore d'établir sa formule (51 à 63. Pb ; 6 à 9. Au ; 0 à 1. Cu ; 3 à 12. S ; 0 à 4,5. Sb ; 13 à 32. Te).

S. rhombique ; R. A. = 0,281 : 1 : 0,276 [1] ; mm = 148°37′.

Cristaux tabulaires $g^1g^{7/3}g^3b^{1/2}e_3e^1e^{1/3}e^{1/5}$, aplatis suivant g^1, avec g^1g^3 = 119°20′ et g^1e^1 = 105°26′.

Clivage g^1 parfait. Généralement en masses feuilletées (*Blætterz*, *Blættertellur*) ; vif éclat métallique, gris de plomb noirâtre ; sectile, flexible en lames minces.

Ch. Colore la flamme en bleu. Dans le tube ouvert, donne des sublimés d'acide antimonieux et d'acide tellureux. Sur le charbon, auréole d'oxyde de plomb, enduit d'antimonite, de tellurite, de sulfate de plomb, avec globule d'or à la flamme oxydante, après longue insufflation. Soluble dans l'eau régale. Réact. 91.

Se trouve en Transylvanie, à Nagyag (d'où le nom de Nagyagite) avec blende, rhodonite et or, et à Offenbanya, avec minerais d'antimoine.

Étym. : ἐλασμός, lame, à cause de sa structure ; malheureusement ce nom, appliqué par Beudant à la Nagyagite, avait d'abord été créé par Huot pour l'Altaïte ou tellurure de plomb (Dana).

MINERAIS DE PLATINE, D'IRIDIUM, D'OSMIUM, DE PALLADIUM

Platine. Pt. — P. S. = 17 à 18 (21 à 23 pour le platine pur martelé). — D. = 4,5 à 5. — S. cubique.

Le platine naturel est rarement pur ; il contient au plus 86 % de platine proprement dit, allié au fer (4 à 12 %), à l'iridium, à l'osmium, au palladium, etc. Les rares cristaux connus ont d'ordinaire les formes p et a^1. Cependant on a trouvé aussi les formes $b^1, b^2, b^3, b^{3/2}, b^{5/2}$.

(1) On admettait, avant M. Schrauf, que l'espèce était quadratique.

Plaques, grains, pépites malléables, d'un gris d'acier tirant sur le blanc d'argent, quelquefois magnétiques et même magnétipolaires. Infusible. Soluble dans l'acide azotique.

Le Platine paraît avoir son gisement originel dans les serpentines chromifères provenant du métamorphisme de gabbros anciens du massif de l'Oural. On le trouve surtout dans des sables d'alluvion dits *sables platinifères*, avec or, chromite, magnétite, zircon, corindon. Outre le platine pur, ces sables contiennent du *Platine ferrifère*, avec 19 % de fer; de l'**Iridium**, cubique (P. S. = 22,7. — D. = 6 à 7); du **Platiniridium** (P. S. = 17); deux variétés d'**Iridosmine** ou *osmiure d'iridium*, l'une et l'autre hexagonales, savoir : 1° la **Newjanskite** Ir^3Os (R. A. = 1 : 1,629; b^1b^1 = 127°36'. — P. S. = 19,4. — D. = 7) à 40 % d'iridium; 2° la **Sysserskite**, peut être rhomboédrique (pp = 84°28'. — P. S. = 21,1 à 21,2. — D. = 7), mélange de $IrOs^3$ avec $IrOs^4$.

Enfin ces sables sont aussi le gisement du **Palladium**, Pd (P. S. = 11,8 à 12,2. — D. = 4,5 à 5). Ce dernier métal, d'un gris d'acier clair, ductile et infusible, se distinguant du platine par sa solubilité dans l'acide azotique, est dimorphe. On le connaît avec la symétrie cubique, sous la forme a^1, et avec la symétrie hexagonale, en petites tables clivables suivant p, d'un blanc d'argent à éclat métallique très vif, auxquelles a été appliquée la dénomination d'*Allopalladium*.

CINQUIÈME SECTION

DESCRIPTION DES MINÉRAUX DU QUATRIÈME GROUPE OU COMBUSTIBLES MINÉRAUX

MINÉRAUX DU CARBONE

Diamant. C. — P. S. = 3,5 à 3,6. — D. = 10. — S. cubique.

Combinaisons d'apparence le plus souvent holoédrique, mais par suite de groupements entre individus accusant un polyèdre hémiaxe dichosymétrique. Les formes les plus fréquentes sont a^1 (ou plutôt $\frac{1}{2}a^1$ dir., $\frac{1}{2}a^1$ inv.) : b^1 ; pa^{2} ; pb^1 ; a^1b^1 ; $b^{3/2}$; $b^{4/3}$; $b^{4/5}$; $\frac{1}{2}a^1$ inv., $\frac{1}{2}$ { $b^1 b^{1/2} b^{1/3}$ }, etc.

Les macles abondent et leur type est la macle par hémitropie moléculaire, associant deux tétraèdres à arêtes croisées (fig. 624), avec les angles abattus

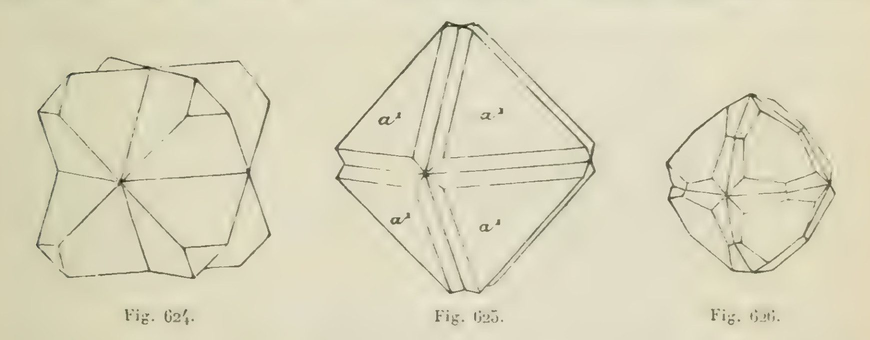


Fig. 624. Fig. 625. Fig. 626.

par les tétraèdres inverses. Quand ces derniers ont un plus grand développement, le cristal prend la forme de la figure 625, s'approchant autant que l'on veut de la symétrie octaédrique ; et comme les faces a^1 qui se présentent sous l'œil de l'observateur sont, toutes ensemble, ou directes ou inverses, elles offrent les mêmes caractères physiques ; cela complète l'illusion, qui ne peut être dissipée que par un examen attentif des arêtes, sur lesquelles on finit par apercevoir des angles rentrants. La même macle, s'accomplissant entre deux hémi-hexoctaèdres, tronqués par a^1, prend la forme dessinée dans la figure 626.

Les formes courbes abondent, comme dans la figure 627, qui représente le dodécaèdre b^1, et dans la figure 628, où deux portions d'un hémihexoctaèdre tronqué par a^1 sont maclées avec a^1 pour face de jonction.

Les faces sont très fréquemment striées et il n'est pas rare d'y observer, soit des stries en escalier, formant des pyramides surbaissées successives, soit des empreintes en creux; ces dernières sont carrées sur les faces p, mais avec les côtés du carré parallèles aux diagonales de la face cubique, et triangulaires sur les faces a^1, le sommet des triangles faisant face à la base du triangle a^1 (1).

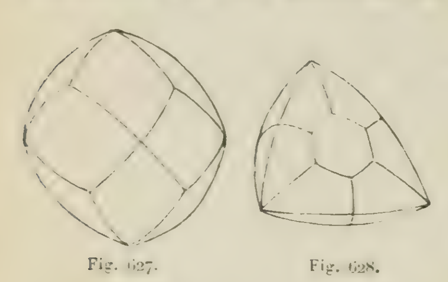


Fig. 627. Fig. 628.

Clivage octaédrique parfait. Cassure conchoïdale. Fragile. Beaucoup plus dur sur p que sur a^1. Ne peut se tailler que par l'emploi de sa propre poussière. Éclat spécial, dit *adamantin*. Transparent, incolore ou coloré en jaune, gris, brun, vert, rouge, bleu, rarement en noir. Réfringence et dispersion énergiques. Ind. = 2,42. Électrique par frottement. Mauvais conducteur. Devient phosphorescent après exposition au soleil ou décharge électrique dans le vide.

Le Diamant présente souvent des indices de biréfringence, qui donnent à penser que sa symétrie cubique n'est qu'apparente.

Le Diamant brûle complètement dans l'oxygène. Un mélange de chromate de potasse et d'acide sulfurique le transforme en acide carbonique. L'attaque par les acides y fait naître des impressions triangulaires polyédriques, dont les facettes correspondent aux faces du trapézoèdre a^3.

On distingue : 1° le *Diamant* proprement dit, c'est-à-dire la plus précieuse des gemmes, dont un individu d'un *carat* (197 à 206 milligrammes) se paye aisément 300 francs; le prix croît à peu près comme le carré du poids (les plus gros diamants taillés ne dépassent guère 200 carats); 2° le *Bort*, ou diamant en boules à structure radiée, utilisé pour le polissage, et plus dur que le diamant cristallisé; 3° le *Carbonado*, en morceaux qui atteignent parfois la grosseur du poing, de couleur noire et employés au forage des trous de mine et de sonde (sondage au diamant). Sa dureté est celle du Bort.

Les plus anciens gisements sont ceux de l'Inde (Golconde), aujourd'hui à peu près épuisés. Ensuite sont venus ceux du Brésil (Minas Geraes, Diamantino, Bahia), ceux de l'Oural, enfin ceux du Cap, où le diamant est disséminé dans une sorte d'ophite, dont le sépare en général une pellicule de calcite.

Étym. : ἀδάμας, acier le plus dur, à cause de sa dureté.

(1) Tschermak, *Lehrbuch*, p. 320.

Graphite. C. — P. S. = 1,9 à 2,3 (2,25 pour le graphite pur de Ceylan). — D. = 0,5 à 1.

On a longtemps considéré le système cristallin du graphite comme dérivant d'un rhomboèdre où $pp = 85°29'$; de telle sorte que ses paillettes hexagonales, aplaties suivant a^1, avec facettes multiples sur les côtés, présenteraient des combinaisons telles que $pa^1d^1b^2$ avec l'isocéloèdre $\{d^1\, d^{\frac{1}{4}}\, b^{\frac{1}{2}}\}$ (fig. 629). Mais les observations faites sur les cristaux de Pargas indiquent, presque avec certitude, une symétrie monoclinique, avec R. A. = 0,581 : 1 : 0,573 ; $mm = 122°24'$; $ph^1 = 108°44'$; $pm = 106°21'$. Les cristaux porteraient surtout les faces mpg^1. Clivage parfait suivant la base p, qui porte des stries croisées à 60 degrés ; clivage m imparfait.

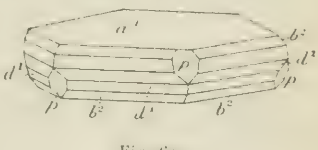


Fig. 629.

Flexible en lames minces, très tendre, onctueux au toucher, tachant le papier et employé pour la fabrication des crayons sous le nom de *Plombagine* ou *Mine de plomb*. Noir de fer, poussière noire, opaque, à éclat métalloïde. Bon conducteur de l'électricité.

Infusible au chalumeau ; brûle dans l'oxygène, plus difficilement que le diamant, entre 600° et 690°, en laissant des cendres ferrugineuses. Inattaquable par les acides ; transformé en acide carbonique par un mélange de chromate de potasse et d'acide sulfurique. Le diamant et le carbone amorphe se transforment en graphite par l'action d'une haute température.

Projeté dans le liquide rouge orangé que produit la dissolution du chlorate de potasse absolument sec dans l'acide azotique fumant, le graphite finit par se transformer en oxyde graphitique vert ou jaune.

Le graphite, rarement cristallisé, se présente en grains aplatis, écailles et quelquefois masses fibreuses, soit dans le calcaire cristallin (Pargas en Finlande, Ticonderoga aux États-Unis), soit dans la granulite, la syénite, le gneiss. Il existe aussi dans certains fers météoriques. Le graphite des cipolins, imbibé d'acide azotique fumant, puis séché et chauffé, foisonne à partir de 175°.

Étym. : γράφειν, écrire.

CHARBONS FOSSILES

Les charbons fossiles, utilisés dans l'industrie comme combustibles, offrent ce caractère d'être complètement solubles, en formant des acides bruns, dans un mélange de chlorate de potasse et d'acide nitrique, employé au-dessous de 100 degrés (1). Ces charbons, qui proviennent de la transformation de substances végétales, forment une série continue, depuis l'anthracite, amené presque à l'état de carbone pur, jusqu'à la tourbe fibreuse, dont la composition diffère très peu de celle des végétaux herbacés ou ligneux.

(1) Berthelot, *in* Des Cloizeaux, *Manuel*, II, p. 26.

Anthracite. — P. S. = 1,3 à 1,75. = 2 à 2,5.

L'Anthracite est essentiellement composé de carbone (87 à 94 %), avec 2 à 4. H; 1 à 7,5. O et 1 à 7 de cendres. Il est amorphe, à cassure conchoïdale, d'un éclat résineux, faiblement métalloïde, d'une couleur très analogue à celle de l'encre de Chine, souvent irisé à la surface, fragile et à rayure noire.

Infusible au chalumeau, l'anthracite brûle avec une flamme courte. Dans le tube fermé dégage un peu d'eau, mais pas d'huiles volatiles.

Détone avec le nitre. Inattaquable par les acides, la potasse caustique, l'éther et l'essence de térébenthine.

Étym. : ἄνθραξ, charbon.

Houille. — P. S. = 1,25 à 1,35. — D. = 2 à 2,5.

Amorphe comme l'anthracite, mais offrant souvent, avec une structure feuilletée, une séparation en surfaces planes, normales au plan des couches, qui imite le clivage des minéraux, la houille possède l'éclat vitreux ou résineux. Elle est d'un noir de velours, parfois brune, à rayure noire, et fragile.

Au chalumeau, brûle facilement avec flamme, fumée noire et odeur bitumineuse. La distillation produit des huiles hydrocarbonées volatiles, du goudron, de l'eau, des gaz éclairants et fréquemment de l'ammoniaque, en laissant pour résidu un charbon poreux et brillant qu'on appelle *coke*.

On distingue (1) les variétés suivantes :

VARIÉTÉS	COMPOSITION MOYENNE		
	CARBONE	HYDROGÈNE	OXYGÈNE ET AZOTE
1. Houilles anthraciteuses	92	4,28	3,19
2. — demi-grasses	90	4,90	5,10
3. — grasses	89	5,31	6,00
4. — grasses maréchales	85	5,35	9,65
5. — demi-grasses à gaz	82	5,35	12,50
6. — maigres flambantes	78	5,35	16,60

Les n°s 2 et 3 perdent, par une calcination de quelques minutes à l'air libre, 20 à 25 % de matières volatiles ; le n° 4 perd 25 à 30 %; le n° 5, environ 30 %; enfin le n° 6, au moins 40 %.

Les conditions de gisement de la houille ne laissent aucun doute sur son origine végétale. Dans bien des cas, du reste, cette origine a pu être directement prouvée. Récemment encore, M. Fayol a recueilli à Commentry des échantillons, dont les uns offrent nettement la texture d'un tronc de fougère arbores-

(1) Des Cloizeaux, *Manuel*, II, p. 29.

cente, tandis que d'autres représentent les écorces, repliées sur elles-mêmes, des *Cordaïtes* ou des *Calamodendron*.

Lignite. — P. S. = 0,5 à 1,25. — D. = 1 à 2.

Le lignite est une houille imparfaite, où la proportion de carbone varie de 55 à 75 %, celle d'hydrogène de 2,5 à 5,7, tandis que l'oxygène et l'azote oscillent entre 17,5 à 36 %. Sa cassure est conchoïdale ou terreuse, sa structure tantôt compacte (*Pechkohle*), tantôt fibreuse et ligneuse (*Jayet*, *Bois bitumineux*, *Erdkohle*), ou feuilletée et enfin terreuse. Éclat cireux, terne. Noir de velours dans le jayet; noir brunâtre ou brun, avec poussière brune, dans les autres variétés.

Facile à enflammer, le lignite donne à la distillation un charbon compact, qui conserve la forme des morceaux employés. A l'air libre, la calcination lui fait perdre 50 à 70 % de matières volatiles, avec production d'une sorte de braise. Il colore en brun une solution de potasse.

Le *Jayet* ou *Jais* est une variété fibro-compacte, longtemps travaillée en bijoux de deuil, notamment à Sainte-Colombe-sur-l'Hers (Aude). La *Terre d'Ombre* ou *Terre de Cologne* est un lignite brun clair, très léger, employé surtout comme couleur. Le nom de *Dysodile* ou *houille papyracée* s'applique à un lignite très schisteux, flexible, légèrement élastique et dégageant par la combustion une odeur très désagréable.

Étym. : *Lignum*, bois.

Tourbe. — P. S. = 1.

La tourbe est une sorte de terreau, compact à la base, fibreux en haut, d'une couleur brune, dégageant une fumée d'odeur caractéristique. C'est de la matière végétale à peine minéralisée, abandonnant à la distillation, comme le bois, de l'acide acétique et presque toujours de l'ammoniaque. Elle laisse un charbon de même forme que les morceaux employés, mais avec retrait des deux tiers. On trouve de 51 à 67. C; 5 à 10. H; 18 à 30. O; 2 à 3. Az, et 14 de cendres.

La **Dopplérite**, $C^{12}H^{14}O^{6}$, amorphe et conchoïdale, noire et plus tendre que le talc, de P. S. = 1,089, est une variété très homogène de tourbe, qui, à l'état frais, se montre gélatineuse et élastique comme du caoutchouc. Au contact de l'air, elle se résout en petits fragments amorphes, d'un noir de velours, à éclat adamantin, de P. S. = 1,466 et D. = 2 à 2,5.

CIRES FOSSILES

Les Cires minérales ou fossiles sont des carbures d'hydrogène, isomorphes de l'essence de térébenthine et généralement cristallisés. Elles diffèrent surtout les unes des autres par la température du point de fusion et proviennent le

plus souvent d'arbres résineux enfouis dans les tourbières. Nous ne mentionnerons ici que quelques espèces typiques.

Schéererite. CH^4. — P. S. = 1 à 2.

Cette espèce est monoclinique; on a observé, sur de très petits cristaux, les faces m, g^1, p, $b^1/_2$ et l'angle de pm sur mm y était de 101°30′. Blanche avec teintes de gris, jaune ou vert, fragile, onctueuse, fusible à 44°, la Schéererite est insoluble dans l'eau et les alcalis, mais soluble dans l'alcool, l'éther, les huiles grasses, enfin les acides azotique et sulfurique.

Elle a été rencontrée dans les fentes d'un bois bitumineux, extrait des lignites d'Utznach, en Suisse.

Étym. : Dédiée à Scheerer.

Ozocérite. $C^{30}H^{62}$ ou $C^n H^{2n+2}$. — P. S. = 0,94 à 0,97.

Cette substance, appelée aussi *Paraffine naturelle*, est d'un vert-poireau par réflexion, brun-jaune ou rouge par transmission, translucide sur les arêtes. Elle se coupe comme la cire et, quand on l'échauffe un peu, se laisse pétrir entre les doigts. Électrique négativement, fluorescente, elle fond à 62° et est entièrement soluble dans l'essence de térébenthine et le naphte; difficilement soluble dans l'éther et l'alcool.

On la trouve en masses, souvent volumineuses, dans le grès tertiaire des Carpathes, ainsi qu'en Moldavie, au Caucase, etc.

Étym. : ὄζω, je sens, et κηρός, cire, à cause de son odeur.

Le *Naphtadil* ou *Neftgil* de la Caspienne est une variété d'Ozocérite, ainsi que la *Hatchettine* (dédiée à Hatchett) ou *suif minéral* du Pays de Galles et de Liège. Cette dernière substance, blanc jaunâtre ou brune, est probablement rhombique. Elle fond entre 46° et 76°. — P. S. = 0,60 à 0,89.

La **Fichtélite**, C^5H^8, ainsi nommée parce qu'on l'obtient en traitant par l'éther le bois de pin de certaines tourbières du Fichtelgebirge, est monoclinique, avec mm = 83°; ph^1 = 127°; pa^1 adj. = 105°; a^1h^1 adj. = 128°. La combinaison mph^1 y prend l'apparence de lames hexagonales.

La densité de la Fichtélite est comprise entre celle de l'eau et celle de l'alcool. La substance est incolore ou jaune, onctueuse, fusible à 46° et se prenant en masse cristalline à 36°.

La *Hartite* est une Fichtélite, fusible seulement à 74°, qui existe en fragments anguleux et en lamelles écailleuses dans les lignites d'Autriche.

Citons encore la **Könleinite** ou **Könlite**, C^5H^4, d'un blanc jaunâtre, probablement rhombique, fusible à 114° et trouvée en plaquettes très minces dans le lignite d'Utznach; enfin l'**Idrialite** (P. S. = 1,4 à 1,6), fusible seulement à 250°, noir-grisâtre, rencontrée en lits minces au toit et au mur des gîtes de cinabre d'Idria (Frioul). Son mélange intime avec le cinabre constitue le *Quecksilberlebererz* des Allemands.

BITUMES

Les bitumes sont des corps liquides, qui résultent en général du mélange de divers hydrocarbures.

Naphte ou **Pétrole**. C^nH^{2n+2}. — P. S. = 0,7 à 0,94.

Le Naphte est un liquide plus ou moins visqueux, blanc jaunâtre ou jaune clair, facilement soluble dans les huiles essentielles et l'éther. Il est constitué par un mélange d'*huiles légères* (naphte proprement dit) et d'*huiles lourdes*. Les premières dissolvent les résines, les bitumes, ainsi que le soufre, le phosphore et l'iode.

Le **Malthe** ou *Bitume glutineux* (*Pissasphaltus* de Pline, Πιττασφαλτος de Dioscoride) est toujours mou et gluant. Il ne diffère du pétrole que par sa consistance.

L'Élatérite ou *Caoutchouc minéral* C^nH^{2n} (P. S. = 0,90 à 1,23) est solide, mais de consistance molle, noire ou brun-noirâtre, sectile, élastique comme le caoutchouc, facilement fusible, et à moitié soluble dans l'éther et dans l'essence de térébenthine.

On la trouve en rognons, masses ou enduits dans certains filons.

Etym. : ἐλάτη, pin.

Asphalte. — P. S. = 1,1 à 1,2. — D. = 2.

L'Asphalte, noir ou brun, fondant au-dessus de 100°, peut être considéré comme un mélange de carbures d'hydrogène et de substances oxygénées, provenant vraisemblablement de l'altération du pétrole.

RÉSINES FOSSILES

Les Résines sont des carbures d'hydrogène oxygénés. Le nombre en est assez grand. Nous nous bornerons à citer quelques espèces :

Copaline. $C^{40}H^{66}O$. — P. S. = 1,04 à 1,05. — D. = 2 à 2,5.

Amorphe ; éclat cireux ; jaune ou brun jaunâtre. Trouvée en fragments dans l'argile de Londres.

Euosmite. — P. S. = 1,2 à 1,5. — D. = 1,5.

Cette espèce, trouvée dans les lignites de Bavière, exhale en brûlant une odeur agréable (d'où son nom) de camphre et de romarin. Elle renferme 82 % de carbone.

Tasmanite. — P. S. = 1,18. — D. = 2.

Cette espèce, remarquable par la présence du soufre (5,32 %), abonde dans un schiste laminaire de la rivière Mersey (Tasmanie).

Succin ou **Ambre**. $C^{40}H^{64}O^{4}$. — P. S. = 1,06 à 1,11. — D. = 2 à 2,5.

Jaune ou brun; éclat résineux; fond à 285°, brûle avec une flamme claire, fuligineuse, répandant une odeur agréable. Facile à électriser par frottement. Le Succin ou *Ambre jaune* est la résine sécrétée par un pin de l'époque tertiaire, *Pinus succinifer*. Il contient souvent des restes d'insectes.

La **Hartine** (P. S. = 1,115) a la même composition que le Succin. Elle fond à 210°.

L'**Ambrite** est gris-jaune et se trouve dans la Nouvelle-Zélande. P. S. = 1,034. — D. = 2.

On peut en rapprocher la *Butyrite* ou *Beurre des tourbières*, blanc-jaunâtre et fusible à 45°.

Pyropissite. — P. S. = 0,493 à 0,922.

Cette espèce, trouvée en masses d'un gris terreux, dans les lignites de Weissenfels, fond au-dessus de 100°; elle est friable et se réduit entre les doigts en une poudre un peu collante.

Rétinasphalte. — P. S. = 1,05 à 1,20. — D. = 1 à 2.

Jaune ou brun jaunâtre; éclat cireux; en nodules arrondis, à surface rugueuse, dans la tourbe ou le lignite. La **Walchowite** de Moravie, $C^{12}H^{18}O$, en est une variété jaune.

SELS ORGANIQUES

Quelques minéraux sont formés par l'union d'acides organiques avec des bases telles que l'alumine, la chaux et le fer. A cette catégorie appartiennent les espèces suivantes :

Mellite. $H^{36}Al^{2}C^{12}O^{30}$. — P. S. = 1,57 à 1,64. — D. = 2 à 2,5. — S. quadratique; R. A. = 1 : 0,745.

La Mellite est une combinaison d'acide mellique $C^{12}H^{6}O^{12}$ avec de l'alumine et une quantité d'eau s'élevant à 45 %. On la trouve en petits cristaux octaédriques éclatants, jaune de soufre, offrant la combinaison $mh^1pb^1/_2$ (fig. 630). On observe encore $pb^1/_2$: $h^1b^1/_2$; $h^1pb^1/_2$; $h^1pa^1b^1/_2$. Angles : $pb^1/_2 = 133°27'$; $b^1/_2b^1/_2$

adj. = 118°14′ sur a^1; $b^{1/2}m$ = 136°33′. Faces p rugueuses et arrondies. Clivage $b^{1/2}$, très difficile. Double réfraction assez énergique, négative. $n_m = 1,539$ (D); $n_p = 1,5107$.

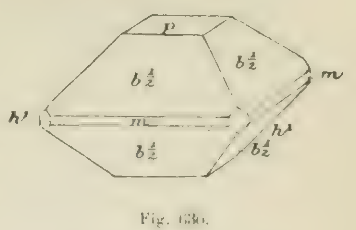


Fig. 636.

Anomalies optiques. Blanc-jaunâtre, jaune miel ou brune. Assez fragile.

Ch. : Dans le matras, dégage de l'eau et se carbonise sans odeur sensible. Au chalumeau, brûle en laissant de l'alumine blanche.

Se trouve en cristaux souvent caverneux dans le bois du lignite de la Thuringe, ainsi qu'en Bohême, en Moravie, en Russie.

Les cristaux en apparence les plus nets sont formés par le groupement d'individus à axes parallèles.

Etym. : *Mel*, *mellis*, miel.

Whewellite. $H^4Ca^2C^4O^{10}$. — P. S. = 1,833. — D. = 2,5 à 2,75. — S. monoclinique; mm = 100°36′; pa^1 = 187°28′; pm post. = 76°46′.

La Whewellite ou Oxalate de chaux est une substance, jusqu'ici fort rare, en cristaux de petite taille $mg^3g^1pa^1e^1d^1$ avec $\{b^1d^1/_2g^1\}$, fréquemment maclés par hémitropie normale à a^1 et pourvus des clivages p, m, g^1. A. O. dans g^1. Incolore. Éclat vitreux, très fragile.

Etym. : Dédiée au docteur Whewell.

On trouve dans les lignites de Hongrie un oxalate de fer, la **Humboldtine**, $H^6Fe^2C^4O^{11}$, probablement rhombique, en petites masses jaune-d'ocre ou jaune de soufre. P. S. = 2,25. — D. = 2. A la bougie, noircit et devient magnétique. Au chalumeau, dégage une odeur végétale et se transforme en oxyde rouge de fer.

Etym. : Dédiée à Humboldt.

L'oxalate de chaux et d'ammoniaque est un des principes constitutifs du guano, dont nous avons déjà parlé à propos des phosphates.

TABLEAUX

indiquant, pour les principales formes cristallines, la concordance entre les notations de LÉVY, MILLER, NAUMANN et DANA.

SYSTÈMES	LÉVY	MILLER	NAUMANN	DANA
	p	001	$\infty O \infty$	O
	a^1	111	O	I
	b^1	011	∞O	i
	$b^{\frac{s}{r}}$	$0rs$	$\infty O \frac{s}{r}$	$i - \frac{s}{r}$
	b^2	012	$\infty O 2$	$i - 2$
SYSTÈME CUBIQUE	$a^{\frac{s}{r}}$	rrs	$\frac{s}{r} O \frac{s}{r}$	$\frac{s}{r} - \frac{s}{r}$
	a^2	112	$2 O 2$	$2 - 2$
	$a^{\frac{r}{s}}$	rss	$\frac{s}{r} O$	$\frac{s}{r}$
	$a^{\frac{1}{2}}$	122	$2 O$	2
	$b^{\frac{1}{q}}$ $b^{\frac{1}{r}}$ $b^{\frac{1}{s}}$	qrs	$\frac{s}{q} O \frac{s}{r}$	$\frac{s}{q} - \frac{s}{r}$
	b^1 $b^{\frac{1}{3}}$ $b^{\frac{1}{4}}$	134	$4 O \frac{4}{3}$	$4 - \frac{4}{3}$
	p	0001	$o P$	O
	m	$10\bar{1}0$	∞P	I
	h^1	$11\bar{2}0$	$\infty P 2$	$i - 2$
	$h^{\frac{r}{q}}$	$qr\overline{q+r}0$	$\infty P \frac{q+r}{q}$	$i - \frac{q+r}{q}$
	h^3	$13\bar{4}0$	$\infty P \frac{4}{3}$	$i - \frac{4}{3}$
SYSTÈME HEXAGONAL	$b^{\frac{s}{q}}$	$q0\bar{q}s$	$\frac{q}{s} P$	$\frac{q}{s}$
	$b^{\frac{1}{2}}$	$20\bar{2}1$	$2 P$	2
	$a^{\frac{s}{r}}$	$rr\overline{2r}s$	$\frac{2r}{s} P 2$	$\frac{2r}{s} - 2$
	a^2	$11\bar{2}2$	$P 2$	$1 - 2$
	$b^{\frac{1}{q}}$ $b^{\frac{1}{r}}$ $h^{\frac{1}{s}}$	$qr\overline{q+r}s$	$\frac{q+r}{s} P \frac{q+r}{r}$	$\frac{q+r}{s} - \frac{q+r}{r}$
	b^1 $b^{\frac{1}{2}}$ $h^{\frac{1}{3}}$	$12\bar{3}3$	$P \frac{3}{2}$	$1 - \frac{3}{2}$

SYSTÈMES	Lévy	Miller	Naumann	Dana
	p	001	$o P$	O
	m	110	∞P	I
	h^1	100	$\infty P \infty$	$i - i$
	$h^{\frac{r+q}{r-q}}$	$q r o$	$\infty P \frac{r}{q}$	$i - \frac{r}{q}$
	h^2	130	$\infty P 3$	$i - 3$
	$a^{\frac{s}{q}}$	$q o s$	$\frac{q}{s} P \infty$	$\frac{q}{s} - i$
	a^2	102	$\frac{1}{2} P \infty$	$\frac{1}{2} - i$
SYSTÈME QUADRATIQUE	$b^{\frac{s}{2r}}$	$r r s$	$\frac{r}{s} P$	$\frac{r}{s}$
	b^1	112	$\frac{1}{2} P$	$\frac{1}{2}$
	$b^{\frac{1}{2}}$	111	P	1
	$b^{\frac{1}{q-r}}\ b^{\frac{1}{q+r}}\ h^{\frac{1}{s}}$	$q r s$	$\frac{q}{s} P \frac{q}{r}$	$\frac{q}{s} . \frac{q}{r}$
	a_3	211	$2 P 2$	$2 . 2$
	a_2	312	$\frac{3}{2} P 3$	$\frac{3}{2} . 3$
	$b^1\ b^{\frac{1}{5}}\ h^1$	321	$3 P \frac{3}{2}$	$3 . \frac{3}{2}$
	p	100	$+ R$	1 R ou 1
	a^1	111	$o R$	O
	d^1	$1 0 \bar{1}$	$\infty R 2$	$i - 2$
	$a^{\frac{q}{s}}$	$q s s$ $(q > s)$	$+ \frac{q - s}{2s + q} R$	$+ \frac{q - s}{2s + q}$
SYSTÈME RHOMBOÉDRIQUE	a^3	311	$+ \frac{2}{5} R$	$+ \frac{2}{5}$
	$a^{\frac{s}{r}}$	$r r s$ $(r > s)$	$- \frac{r - s}{2r + s} R$	$- \frac{r - s}{2r + s}$
	$a^{\frac{1}{2}}$	221	$- \frac{1}{5} R$	$- \frac{1}{5}$
	b^1	110	$- \frac{1}{2} R$	$- \frac{1}{2}$ R ou $- \frac{1}{2}$

SYSTÈMES	LÉVY	MILLER	NAUMANN	DANA
SYSTÈME RHOMBOÉDRIQUE (*suite*)	e^{r}	$r\,r\,\bar{s}$	$-\frac{r+s}{2r-s}R$	$-\frac{r+s}{2r-s}$
	$e^{\frac{1}{2}}$	$2\,2\,\bar{1}$	$-R$	-1
	e^{2}	$1\,1\,\bar{2}$	$+\infty R$	i
	$e^{\frac{q}{s}}$	$q\,\bar{s}\,\bar{s}$ $(q > 2s)$	$+\frac{q+s}{q-2s}R$	$+\frac{q+s}{q-2s}$
	e^{3}	$3\,\bar{1}\,\bar{1}$	$+4R$	$+4$
	$b^{\frac{1}{q+r}}\ d^{\frac{1}{r}}\ d^{\frac{1}{q}}$	$q\,r\,\overline{q+r}$	$\infty R\frac{2q+r}{q+2r}$	$i\text{-}\frac{2q+r}{q+2r}$
	$b^{\frac{1}{3}}\ d^{1}\ d^{\frac{1}{2}}$	$2\,1\,\bar{3}$	$\infty R\frac{5}{4}$	$i\text{-}\frac{5}{4}$
	$b^{\frac{1}{s}}\ b^{\frac{1}{r}}\ b^{\frac{1}{q}}$	$q\,r\,s$	$+\frac{q-s}{q+r+s}R\frac{q-s}{q-r}$	
	id.	id.	$-\frac{q-s}{q+r+s}R\frac{q-s}{r-s}$	
	$b^{\frac{q}{r}}$	$q\,r\,0$	$-\frac{q}{q+r}R\frac{q}{r}$	
	id.	id.	$+\frac{q}{q+r}R\frac{q}{q-r}$	
	b^{4}	$4\,1\,0$	$+\frac{4}{5}R\frac{4}{3}$	
	$b^{\frac{1}{s}}\ d^{\frac{1}{r}}\ d^{\frac{1}{q}}$	$q\,r\,\bar{s}$	$+\frac{q+s}{q+r-s}R\frac{q+s}{q-s}$	$\frac{q+s}{q+r-s}\cdot^{\frac{q+s}{q-s}}$
	$c_{\frac{q}{r}}$	$q\,r\,\bar{r}$	$+\frac{q+r}{q}R\frac{q+r}{q-r}$	
	c_{3}	$3\,1\,\bar{1}$	$+\frac{4}{3}R2$	
	$b^{\frac{1}{q}}\ d^{\frac{1}{r}}\ d^{\frac{1}{s}}$	$q\,\bar{r}\,\bar{s}$	$+\frac{s+q}{q-r-s}R\frac{s+q}{r+q}$	
	$d^{\frac{q}{s}}$	$q\,0\,\bar{s}$	$+\frac{q+s}{q-s}R\frac{q+s}{q}$	$1\frac{q+s}{q-s}$
	$b^{\frac{1}{2r-q}}\ b^{\frac{1}{r}}\ b^{\frac{1}{q}}$ $b^{\frac{1}{2r-q}}\ d^{\frac{1}{r}}\ d^{\frac{1}{q}}$	$q\,r\,(2r-q)$ $q\,r\,(2r-q)$	$\frac{2(q-r)}{3r}P.2$	$\frac{2(q-r)}{3r}\text{-}2$
	b^{2}	$2\,1\,0$	$\frac{2}{3}P2$	$\frac{2}{3}\text{-}2$

SYSTÈME RHOMBOÉDRIQUE (APPENDICE)

A cause de l'importance du système rhomboédrique, et des variantes que comporte sa notation chez les auteurs allemands, nous croyons devoir donner ici les symboles des formes les plus usuelles, à la fois suivant les notations de Lévy, de Miller, de Bravais et de Naumann-Zirkel.

Nous rappellerons d'abord que si (qrs) est la notation d'une face pour Miller, $(q', r', \overline{q'+r'}, s')$ la notation de la même face pour Bravais, on a, d'une part :

$$q = 2q' + r' + s' \qquad r = -q' + r' + s' \qquad s = -q' - 2r' + s'$$

et, d'autre part :

$$q' = q - r \qquad r' = r - s \qquad s' = q + r + s$$

Quant à la notation de Naumann-Zirkel, comparée à celle de Bravais elle donne les résultats suivants :

Bravais.	Naumann-Zirkel.
$r\,o\,\bar{r}\,s$	$\frac{r}{s}R$
$o\,r\,\bar{r}\,s$	$-\frac{r}{s}R$
$q\,r\,\overline{q+r}\,s$ avec $q > r$	$\frac{q-r}{s}R\frac{q+r}{q-r}$
$q\,r\,\overline{q+r}\,s$ avec $q < r$	$-\frac{r-q}{s}R\frac{q+r}{r-q}$
$r\,r\,\overline{2r}\,s$	$\frac{2r}{s}P2$
$q\,r\,\overline{q+r}\,o$	$\infty P\frac{q+r}{q}$

Cela posé, voici les concordances répondant aux formes le plus souvent réalisées :

FORMES	LÉVY	MILLER	BRAVAIS	NAUMANN-ZIRKEL
PRINCIPALES	p	100	$10\bar{1}1$	R
	e^2	$21\bar{1}$	$10\bar{1}0$	∞R
	d^1	$10\bar{1}$	$11\bar{2}0$	$\infty P2$
	b^1	110	$01\bar{1}2$	$-\frac{1}{2}R$
	a^1	111	0001	oR
RHOMBOÈDRES INVERSES	$a^{1/3}$	331	$02\bar{2}7$	$-\frac{2}{7}R$
	$a^{1/2}$	221	$01\bar{1}5$	$-\frac{1}{5}R$
	$a^{2/3}$	332	$01\bar{1}8$	$+\frac{1}{8}R$

FORMES	LÉVY	MILLER	BRAVAIS	NAUMANN-ZIRKEL
RHOMBOÈDRES DIRECTS	$a^{3}/_{2}$	322	$10\bar{1}7$	$+\frac{1}{7}R$
	a^{2}	211	$10\bar{1}4$	$+\frac{1}{4}R$
	$a^{5}/_{2}$	522	$10\bar{1}3$	$+\frac{1}{3}R$
	a^{3}	311	$20\bar{2}5$	$+\frac{2}{5}R$
	a^{4}	411	$10\bar{1}2$	$+\frac{1}{2}R$
RHOMBOÈDRES INVERSES	$e^{1}/_{2}$	$22\bar{1}$	$01\bar{1}1$	$-R$
	$e^{2}/_{3}$	$33\bar{2}$	$05\bar{5}4$	$-\frac{5}{4}R$
	$e^{4}/_{5}$	$55\bar{4}$	$03\bar{3}2$	$-\frac{3}{2}R$
	e^{1}	$11\bar{1}$	$02\bar{2}1$	$-2R$
	$e^{8}/_{7}$	$77\bar{8}$	$05\bar{5}2$	$-\frac{5}{2}R$
	$e^{13}/_{8}$	$8.8.\overline{13}$	$07\bar{7}1$	$-7R$
RHOMBOÈDRES DIRECTS	$e^{7}/_{3}$	$7\bar{3}\bar{3}$	$10.0.\overline{10}.1$	$+10R$
	$e^{5}/_{2}$	$5\bar{2}\bar{2}$	$70\bar{7}1$	$+7R$
	e^{3}	$3\bar{1}\bar{1}$	$40\bar{4}1$	$+4R$
	e^{5}	$5\bar{1}\bar{1}$	$20\bar{2}1$	$+2R$
	e^{8}	$8\bar{1}\bar{1}$	$30\bar{3}2$	$+\frac{3}{2}R$
ISOCÉLOÈDRES	b^{2}	210	$11\bar{2}3$	$\frac{2}{3}R2$
	$b^{1}\ b^{1}/_{2}\ b^{1}/_{3}$	321	$11\bar{2}6$	$\frac{1}{3}P2$
	$b^{1}/_{2}\ b^{1}/_{5}\ b^{1}/_{8}$	852	$11\bar{2}5$	$\frac{2}{5}P2$
	$b^{1}\ b^{1}/_{4}\ b^{1}/_{7}$	741	$11\bar{2}4$	$\frac{1}{2}P2$
	$b^{1}\ d^{1}/_{2}\ d^{1}/_{5}$	$52\bar{1}$	$11\bar{2}2$	$P2$
	$b^{1}\ d^{1}\ d^{1}/_{3} = e_{3}$	$31\bar{1}$	$22\bar{4}3$	$\frac{4}{3}P2$
	$b^{1}/_{2}\ d^{1}\ d^{1}/_{4}$	$41\bar{2}$	$11\bar{2}1$	$2P2$
	$b^{1}/_{3}\ d^{1}\ d^{1}/_{5}$	$51\bar{3}$	$44\bar{8}3$	$\frac{8}{3}P2$

FORMES	LÉVY	MILLER	BRAVAIS	NAUMANN-ZIRKEL
	$b^3/_2$	$3 2 0$	$1 2 \bar{3} 5$	$-\frac{1}{5}R3$
	$b^5/_3$	$5 3 0$	$2 3 \bar{5} 8$	$-\frac{1}{8}R5$
	b^3	$2 1 0$	$2 1 \bar{3} 4$	$\frac{1}{4}R3$
	$d^3/_2$	$3 0 \bar{2}$	$3 2 \bar{5} 1$	$R5$
	d^2	$2 0 \bar{1}$	$2 1 \bar{3} 1$	$R3$
	d^3	$3 0 \bar{1}$	$3 1 \bar{4} 2$	$R2$
	$b^1\ d^1\ d^1/_2 = e_2$	$2 1 \bar{1}$	$1 2 \bar{3} 2$	$-\frac{1}{2}R3$
	$b^1/_5\ d^1/_3\ d^1/_7$	$7 3 \bar{5}$	$4 . 8 . \overline{12} . 5$	$-\frac{4}{5}R3$
SCALÉNOÈDRES	$b^1/_4\ d^1/_3\ d^1/_4$	$4 3 \bar{4}$	$1 7 \bar{8} 3$	$-2R\frac{4}{3}$
	$b^1/_2\ d^1\ d^1/_7$	$7 1 \bar{2}$	$2 1 \bar{3} 2$	$\frac{1}{2}R3$
	$b^1/_4\ d^1/_2\ d^1/_5$	$5 2 \bar{4}$	$1 2 \bar{3} 1$	$-R3$
	$b^1/_4\ d^1\ d^1/_8$	$8 1 \bar{4}$	$7 . 5 . \overline{12} . 5$	$\frac{2}{5}R6$
	$b^1/_2\ d^1\ d^1/_3$	$3 1 \bar{3}$	$2 4 \bar{6} 1$	$-2R3$
	$b^1/_3\ d^1\ d^1/_3$	$3 1 \bar{2}$	$2 3 \bar{5} 2$	$-\frac{1}{2}R5$
	$b^1/_4\ d^1\ d^1/_2$	$4 \bar{1} \bar{2}$	$5 1 \bar{6} 1$	$6P\frac{6}{5}$
	$b^1/_8\ d^1\ d^1/_4$	$8 \bar{1} \bar{4}$	$3 1 \bar{4} 1$	$4P\frac{4}{3}$
PRISMES DODÉCAGONAUX	$b^1/_6\ d^1\ d^1/_5$	$6 \bar{1} \bar{5}$	$7 . 4 . \overline{11} . 0$	$\infty P\frac{11}{7}$
	$b^1/_3\ d^1\ d^1/_2$	$3 \bar{1} \bar{2}$	$4 1 \bar{5} 0$	$\infty P\frac{5}{4}$

SYSTÈMES	LÉVY	MILLER (MODIFIÉ)	NAUMANN	DANA
	p	001	oP	O
	m	110	∞P	I
	h^1	100 (1)	$\infty \bar{P} \infty$	$i-\bar{i}$
	g^1	010	$\infty \breve{P} \infty$	$i-\breve{i}$
	$h^{\frac{q+r}{r-q}} (q < r)$	$qr0$	$\infty \bar{P} \frac{r}{q}$	$i-\frac{r}{q}$
	h^2	130	$\infty \bar{P} 3$	$i-\bar{3}$
	$g^{\frac{q+r}{q-r}} (q > r)$	$qr0$	$\infty \breve{P} \frac{q}{r}$	$i-\frac{\breve{q}}{r}$
	g^2	310	$\infty \breve{P} 3$	$i-\breve{3}$
	$a^{\frac{s}{r}}$	$r0s$	$\frac{r}{s} \bar{P} \infty$	$\frac{r}{s}-i$
	a^1	101	$\bar{P} \infty$	$1-\bar{i}$
SYSTÈME	a^2	102	$\frac{1}{2} \bar{P} \infty$	$\frac{1}{2}-\bar{i}$
RHOMBIQUE	$e^{\frac{s}{q}}$	$0qs$	$\frac{q}{s} \breve{P} \infty$	$\frac{q}{s}-\breve{i}$
	e^1	011	$\breve{P} \infty$	$1-\breve{i}$
	e^2	012	$\frac{1}{2} \breve{P} \infty$	$\frac{1}{2}-\breve{i}$
	$b^{\frac{s}{2r}}$	rrs	$\frac{q}{s} P$	$\frac{q}{s}$
	$b^{1/2}$	111	P	1
	b^1	112	$\frac{1}{2} P$	$\frac{1}{2}$
	$b^{\frac{1}{q+r}}\ b^{\frac{1}{q-r}}\ g^{\frac{1}{s}}$	$qrs (q > r)$	$\frac{q}{s} \breve{P} \frac{q}{r}$	$\frac{q}{s} . \frac{\breve{q}}{r}$
	$b^1\ b^{\frac{1}{3}}\ g^1 = e_3$	211	$2 \breve{P} 2$	$2-\breve{2}$
	$b^{\frac{1}{r-q}}\ b^{\frac{1}{q+r}}\ h^{\frac{1}{s}}$	$qrs (q < r)$	$\frac{r}{s} \bar{P} \frac{r}{q}$	$\frac{r}{s} . \frac{\bar{r}}{q}$
	$b^1\ b^{1/3}\ h^1$	231	$3 P \frac{3}{2}$	$3 . \frac{3}{2}$

(1) À l'exemple de Naumann, et contrairement à l'usage suivi par Miller, nous avons pris ici la macrodiagonale pour axe des y et la brachydiagonale pour axe des x. Les notations sont donc ici inverses de celles qui ont été données à la page 184.

SYSTÈMES	LÉVY	MILLER (MODIFIÉ)	NAUMANN	DANA
	p	001	$0P$	O
	m	110	∞P	I
	g^1	010	$\infty P \infty$ ou $\infty \breve{P} \infty$	$i\text{-}\grave{i}$
	h^1	100	$\infty \bar{P} \infty$	$i\text{-}i$
	$g^{\frac{q+r}{r-q}}(q<r)$	$q\,r\,0$	$\infty \grave{P} \frac{r}{q}$	$\grave{i}\text{-}\frac{r}{q}$
	g^3	120	$\infty \grave{P} 2$	$\grave{i}\text{-}2$
	$h^{\frac{q+r}{q-r}}(q>r)$	$q\,r\,0$	$\infty \bar{P} \frac{q}{r}$	$i\text{-}\frac{q}{r}$
	h^2	310	$\infty \bar{P} 3$	$i\text{-}3$
	$e^{\frac{s}{r}}$	$0\,r\,s$	$\frac{s}{r} \grave{P} \infty$	$\frac{r}{s}\text{-}\grave{i}$
	e^1	011	$\grave{P} \infty$ ou $\breve{P} \infty$	$\grave{i}$
	e^2	012	$\frac{1}{2} \grave{P} \infty$	$\frac{1}{2}\text{-}\grave{i}$
	$a^{\frac{s}{q}}$	$\bar{q}\,0\,s$	$+\frac{q}{s} \bar{P} \infty$	$\frac{q}{s}\text{-}i$
	a^1	$\bar{1}\,0\,1$	$+\bar{P} \infty$	i
	a^2	$\bar{1}\,0\,2$	$+\frac{1}{2} \bar{P} \infty$	$\frac{1}{2}\text{-}i$
SYSTÈME	$o^{\frac{s}{q}}$	$q\,0\,s$	$-\frac{q}{s} \bar{P} \infty$	$\frac{q}{s}\text{-}\bar{i}$
MONOCLINIQUE	o^1	101	$-\bar{P} \infty$	$\bar{i}$
	o^2	102	$-\frac{1}{2} \bar{P} \infty$	$2\text{-}\bar{i}$
	$d^{\frac{s}{2q}}$	$q\,q\,s$	$-\frac{q}{s} P$	$-\frac{q}{s}$
	$d^{\frac{1}{2}}$	111	$-P$ ou $\bar{P}$	-1
	d^1	112	$-\frac{1}{2} P$ ou $\frac{1}{2} \bar{P}$	$-\frac{1}{2}$
	$d^{1/4}$	221	$-2P$	-2
	$b^{\frac{2q}{s}}$	$\bar{q}\,q\,s$	$+\frac{q}{s} P$	$+\frac{q}{s}$
	$b^{\frac{1}{2}}$	$\bar{1}\,1\,1$	$+P$	$+1$
	b^1	$\bar{1}\,1\,2$	$+\frac{1}{2} P$	$+\frac{1}{2}$
	$d^{\frac{1}{r-q}}\ b^{\frac{1}{q+r}}\ g^{\frac{1}{s}}$	$q\,r\,s\,(q<r)$	$-\frac{r}{s} \grave{P} \frac{r}{q}$	$-\frac{r}{s} \cdot \frac{r}{q}$
	$b^{\frac{1}{r-q}}\ d^{\frac{1}{q+r}}\ g^{\frac{1}{s}}$	$\bar{q}\,r\,s\,(q<r)$	$+\frac{r}{s} \grave{P} \frac{r}{q}$	$+\frac{r}{s} \cdot \frac{r}{q}$
	$d^{\frac{1}{q-r}}\ d^{\frac{1}{q-r}}\ h^{\frac{1}{s}}$	$q\,r\,s\,(q>r)$	$-\frac{q}{s} \bar{P} \frac{q}{r}$	$-\frac{q}{s} \cdot \frac{q}{r}$
	$b^{\frac{1}{q-r}}\ b^{\frac{1}{q-r}}\ h^{\frac{1}{s}}$	$\bar{q}\,r\,s\,(q>r)$	$+\frac{q}{s} \bar{P} \frac{q}{r}$	$+\frac{q}{s} \cdot \frac{q}{r}$

SYSTÈMES	LÉVY	MILLER	NAUMANN	DANA
SYSTÈME TRICLINIQUE	p	$0\,0\,1$	$0\,P$	O
	m	$\bar{1}\,1\,0$	$\infty' P$	I
	t	$1\,1\,0$	$\infty P'$	I'
	g^1	$0\,1\,0$	$\infty \breve{P} \infty$	$i - \breve{\imath}$
	h^1	$1\,0\,0$	$\infty \bar{P} \infty$	$i - \bar{\imath}$
	$g^{\frac{q-r}{r-q}}$	$q\,r\,0$	$\infty \breve{P}'{}_{,}\frac{r}{q}$	$i - \frac{\breve{r}}{q}$
	$\frac{q+r}{r-q}g$	$\bar{q}\,r\,0$	$\infty'{}_{,}\breve{P}\frac{r}{q}$	$i - \frac{\breve{r}'}{q}$
	$h^{\frac{q+r}{q-r}}$	$q\,r\,0$	$\infty \bar{P}'{}_{,}\frac{q}{r}$	$i - \frac{q}{r}$
	$\frac{q+r}{q-r}h$	$\bar{q}\,r\,0$	$\infty'{}_{,}\bar{P}\frac{q}{r}$	$i - \frac{\bar{q}'}{r}$
	$e^{\frac{1}{2}}$	$0\,2\,\bar{1}$	$2'\breve{P}_{,}\infty$	$2\breve{\imath}$
	$i^{\frac{1}{2}}$	$0\,2\,1$	$2'\breve{P}'\infty$	$2\breve{\imath}'$
	o^2	$1\,0\,2$	$\frac{1}{2}{}'\bar{P}'\infty$	$\frac{1}{2}.\bar{\imath}'$
	a^2	$\bar{1}\,0\,2$	$\frac{1}{2}{}_{,}\bar{P}_{,}\infty$	$\frac{1}{2}.\bar{\imath}$
	$b^{\frac{1}{2}}$	$1\,1\,\bar{1}$	$P_{,}$	$1'$
	$c^{\frac{1}{2}}$	$\bar{1}\,1\,1$	$\frac{2}{3}{}'P$	1

RECUEIL D'INDICATIONS PRATIQUES

POUR LA DÉTERMINATION

DES CRISTAUX ET DES ESPÈCES MINÉRALES USUELLES

Les indications qui vont suivre ont été rédigées principalement en vue des élèves des Facultés des sciences et de ceux des écoles spéciales où l'examen de Minéralogie ne porte que sur les espèces les plus importantes.

L'utilité de ces données pratiques est liée, pour une grande part, au nombre, relativement peu considérable, des minéraux entre lesquels l'élève peut hésiter dans chaque cas particulier. Leur valeur serait beaucoup moindre, si l'on voulait en étendre l'application au delà de ce qu'il est permis d'appeler les espèces et les formes *classiques*.

Cependant, à côté de ces dernières, il nous arrivera parfois de mentionner des espèces ou des formes qui sont, dans les examens, d'un usage moins courant. On les reconnaîtra à une astérisque (*), placée à la suite du nom. D'autre part, pour mieux distinguer ce qui est vraiment caractéristique et doit surtout rester dans la mémoire des élèves, nous nous sommes arrêté aux conventions suivantes :

Toutes les fois que la forme ou la propriété physique qui commande un paragraphe de ce Recueil n'est qu'*accidentellement* réalisée par une espèce, le nom de celle-ci est imprimé en caractères romains. L'emploi des italiques signifie qu'il s'agit, pour le minéral, d'une forme ou d'une propriété *très habituelle*. Enfin, quand le caractère est *constant*, **le nom de l'espèce est imprimé en petites capitales.**

Dans les indications qui suivent le numéro de chaque espèce, on a mentionné les essais rapides auxquels on peut avoir recours, soit pour guider ceux qui voudraient y procéder eux-mêmes, soit pour suggérer aux élèves les questions qu'il est opportun de poser en présence de l'examinateur, si l'on veut faire preuve d'un diagnostic méthodique.

DÉTERMINATION DES ESPÈCES EN CRISTAUX NETS (1)

I. — CRISTAUX DU SYSTÈME CUBIQUE

Cube simple (*p.* fig. 59).

1, Boracite * ; **2**, *Sel gemme* ; **3**, Perowskite *, *Dysanalyte* * ; **4**, *Fluorine* ; **5**, *Pyrite* ;

(1) Comme il s'agit d'indications pratiques en vue d'une détermination rapide, les formes cristallines mentionnées se rapportent à la symétrie *apparente* ; et il n'est pas tenu compte ici de la symétrie réelle, souvent contradictoire avec l'autre, qui peut se révéler par l'examen optique.

6, *Pharmacosidérite**; 7, Cobaltine; 8, *Galène*; 9, Cuprite; 10, BOLÉITE*; 11, *Argyrite*; 12, Diamant*.

1, Petits cristaux clairs, réact. 18; 2, soluble, saveur caractéristique; 3, petits cristaux infusibles, jaunâtres pour la Perowskite, d'un noir métallique pour la Dysanalyte; 4, transparente ou translucide, rayée au canif; 5, métallique, jaune, parfois brunie à la surface; 6, petits cristaux verts; 7, couleur blanc-gris; après grillage, réact. 51; 8, très lourde, clivages cubiques de vif éclat; réact. 35, 38; 9, rouge foncé, très réfringente, parfois avec enduit vert; 10, petits cristaux d'un beau bleu foncé (1); 11, fusible, sectile, sans clivages; 12, vif éclat, dureté extrême.

Il convient d'ajouter à cette liste deux substances d'apparence cubique, la Cryolite (fusible à la bougie), et les cristaux de clivage d'Anhydrite, où les trois directions rectangulaires ont des propriétés physiques inégales.

Octaèdre régulier simple (a^1, fig. 60).

1, SPINELLE ROSE (RUBIS BALAIS); 2, *Spinelle noir* (*Pléonaste*); 3, CHLOROSPINELLE*; 4, *Pyrochlore*; 5, *Fluorine*; 6, SÉNARMONTITE*; 7, *Hauérite**; 8, Pyrite; 9, *Magnétite*; 10, *Martite**; 11, *Franklinite*; 12, Cuivre natif*; 13, *Cuprite*; 14, *Diamant**.

1, Petits cristaux rouges, limpides et durs; 2, cristaux noirs, non métalliques, non magnétiques; 3, vert foncé; 4, petits cristaux bruns, vitro-résineux, infusibles; 5, généralement verdâtre et translucide, parfois rose; clivage parallèle aux faces; 6, blanchâtre, translucide, volatile; 7, noir de fer; réact. du manganèse et du soufre; 8, jaune-laiton ou couleur rouille, faisant feu au briquet; 9, noir de fer, magnétique; 10, noire, poussière rouge, non magnétique; 11, moins métallique que 9, poussière rouge-brun, réact. du zinc et du manganèse; 12, rouge de cuivre, cristaux habituellement peu nets; 13, octaèdres rouge-foncé, souvent enduits de carbonate vert mat, réact. du cuivre; 14, faces d'ordinaire un peu courbes; éclat et dureté caractéristiques.

Rhombododécaèdre simple (b^1, fig. 62).

1, HAÜYNE*; 2, NOSEANE*; 3, SODALITE*; 4, *Grossulaire*; 5, *Almandine*; 6, *Mélanite*; 7, OUWAROWITE; 8, Magnétite; 9, Blende; 10, Tennantite*; 11, *Cuprite*; 12, *Diamant**.

1, Cristaux peu nets, bleu d'azur; 2, petits cristaux d'un blanc mat, généralement engagés dans une roche grise; 3, cristaux blancs en géodes dans une roche de grain vitreux très brillant; 4, 5 et 6, tous trois fusibles; 4, ordinairement jaunâtre (Topazolite), verdâtre, brun ou rouge, noir (Pyrénéite), réact. de la chaux; 5, rouge foncé, réact. du fer; 6, noir d'encre brillant; 7, petits cristaux d'un beau vert foncé; 8, gris-noir métallique, magnétique; 9, petits cristaux jaune-miel ou rougeâtres, réact. du soufre; 10, cristaux gris métalliques, réact. du cuivre et de l'arsenic; 11, ordinairement vert mat à la surface (enduit carbonaté), rouge foncé au dedans, réact. du cuivre; 12, à faces généralement très courbes (fig. 627), de vif éclat et de grande dureté.

Cube et Octaèdre (pa^1, fig. 73, 74, 75).

1, *Perowskite**; 2, Fluorine; 3, *Hauérite**; 4, *Pyrite*; 5, *Galène*; 6, *Argyrite*; 7, *Or natif**.

1, Petits cristaux jaunâtres, infusibles; 2, transparente, sans dureté, les faces a^1 résultant généralement de clivage; 3, 4, 5, tous trois métalliques, et faciles à distinguer par leurs couleurs respectives; 6, fusible, sectile et sans clivages; 7, de couleur caractéristique.

Cube et rhombododécaèdre (pb^1, fig. 77, 78).

1, Fluorine; 2, Galène; 3, Cuprite.

Confusion impossible.

1. Ainsi qu'il vient d'être expliqué dans l'introduction, le nom de la Boléite est écrit en capitales, parce que jusqu'ici l'espèce n'est connue qu'en cubes; mais il y a une astérisque, parce qu'il s'agit d'une espèce peu répandue.

Cube, Octaèdre, Rhombododécaèdre (pa^1b^1, fig. 79).

1, *Smaltine* *; **2**, *Galène*; **3**, Cuprite; **4**, *Amalgame* *.

1 et **2**, Distinction facile, grâce aux couleurs et à la densité; **3**, réact. du cuivre; **4**, abandonne du mercure dans le tube.

Cube et Tetrahexaèdre ($pb^{\bar{r}}$, fig. 67).

1, ***Fluorine***; **2**, Cuivre natif *.

1, Cristaux à faces cubiques dominantes, transparents, d'ordinaire violets, verts ou bleus; **2**, facile à distinguer.

Cube et Trapézoèdre (pa^2, fig. 69, 70).

Analcime.

Cristaux généralement incolores, très limpides et de vif éclat. Réact. 23.

Cube et Hexoctaèdre ($p \{ b^{\frac{1}{q}} b^{\frac{1}{r}} b^{\frac{1}{s}} \}$, fig. 65, 534).

Fluorine.

Cristaux généralement incomplets, transparents, à symétrie cubique visible.

Cube et Diploèdre (fig. 101).

Pyrite.

Cube et Dodécaèdre pentagonal (p, $\frac{1}{2}b^2$, fig. 105).

1, *Pyrite*; **2**, *Cobaltine.*

1, Jaune ou rouillée; **2**, blanc d'étain, réact. 51.

Cube et Tétraèdre (p, $\frac{1}{2}a^1$, fig. 118, 120).

1, *Boracite*; **2**, *Pharmacosidérite* *; **3**, *Blende.*

1, Petits cristaux limpides, incolores ou bleus, réact. 16; **2**, cristaux verts, transparents; **3**, cristaux jaune-miel-foncé, d'ordinaire dans une dolomie blanche finement grenue; réact. 39, 44.

Cube, Tétraèdre direct, Tétraèdre inverse (p, $\frac{1}{2}a^1$ dir., $\frac{1}{2}a^1$ inv., fig. 573).

1, *Blende*; **2**, Boracite.

1, Petits octaèdres tronqués, jaunes ou noirâtres, les deux séries de faces se distinguant par la différence de leur éclat; **2**, blanchâtre, se distinguant de **1** par absence de réact. du soufre.

Cube, Rhombododécaèdre, Tétraèdre ($pb^1\frac{1}{2}a^1$. fig. 485).

Boracite.

Petits cristaux blanchâtres, réact. 16.

Octaèdre et Rhombododécaèdre (a^1b^1, fig. 84, 87).

1, Haüyne *; **2**, *Franklinite*; **3**, *Cuprite.*

1, Cristaux d'un blanc-grisâtre, mat; **2**, noir métallique; **3**, verte à la surface, réact. du cuivre.

Octaèdre et Trioctaèdre ($a^1a^{\frac{r}{r+x}}$, fig. 83).

1, Fluorine; **2**, Pyrite; **3**, Galène.

Distinction facile.

Octaèdre et trapézoèdre (fig. 82).

1, Pléonaste; **2**, Franklinite.

1, Cristaux noirs non métalliques; **2**, éclat métallique, réact. du fer, du manganèse et du zinc.

Octaèdre et Dodécaèdre pentagonal (a^1, $\frac{1}{2}b^2$, fig. 106, 108).

1, *Pyrite*; **2**, *Cobaltine*.

1, Jaune ou rouillée; **2**, blanc d'étain.

Rhombododécaèdre et Trapézoèdre (b^1a^2, fig. 92).

1, *Grossulaire*; **2**, *Almandine*; **3**, *Mélanite*.

1, Rouge-hyacinthe, avec a^2 généralement dominant; association très fréquente avec chlorite et diopside; **2**, rouge-foncé, b^1 dominant; **3**, noir, même forme que **2**, et plus petits échantillons.

Rhombododécaèdre et hexoctaèdre (fig. 94).

Magnétite.

Petits cristaux noirs; b^1 dominant.

Rhombododécaèdre, Hexoctaèdre et Trapézoèdre a^2 (fig. 93).

Grenats (surtout Grossulaire et Spessartine).

Rhombododécaèdre dominant et Tétraèdre (b^1, $\frac{1}{2}a^1$).

Schwartzite (*cuivre gris mercurifère*)*.

Cristaux noirs, ternes, réact. du cuivre et du mercure.

Trapézoèdre simple (a^2, fig. 55).

1, *LEUCITE*; **2**, *Analcime*; **3**, *Grenats*.

3, se distingue de **1** et de **2** par sa couleur et sa grande densité; **2**, généralement laiteuse et rosée, se distingue par réact. 23 de **1**, dont la forme n'est d'ailleurs qu'un pseudo-trapézoèdre.

Diploèdre simple (fig. 100).

Pyrite.

Diploèdre, Dodécaèdre pentagonal et octaèdre (fig. 109).

Pyrite.

Dodécaèdre pentagonal simple (fig. 103).

1, *Pyrite*; **2**, Cobaltine.

1, Jaune ou rouillée; **2**, grise.

Tétraèdre simple ($\frac{1}{2}a^1$, fig. 117).

1, *ZUNYITE**; **2**, *Helvine**; **3**, *Panabase*.

1, Petits cristaux vitreux, incolores, rayant le verre; **2**, cristaux jaune-miel, fusibles; **3**, cristaux gris d'acier noirâtre; réact. du cuivre.

Tétraèdre direct et Tétraèdre inverse (fig. 119).

1, *Zunyite**; **2**, *Helvine**; **3**, *Blende*; **4**, *Panabase*.

1, Incolore, infusible; **2**, fusible; **3**, jaune ou noire, avec réact. du zinc; **4**, gris-noir, réact., du cuivre.

Tétraèdre avec Tritétraèdre (fig. 121).

1, *Helvine*; **2,** *Eulytine* *; **3,** *Panabase.*

1, cristaux jaune-miel, fusibles; **2,** petits cristaux bruns, à faces arrondies, d'éclat adamantin, où le tétraèdre simple est très peu développé, mais où se montre le cube; décrépitent dans le tube; l'espèce n'est que pseudo-cubique; **3,** gris-noirâtre: réact. du cuivre.

Tétraèdre dominant avec Rhombododécaèdre (fig. 122).

1, *Helvine* *; **2,** *Panabase.*

II. — CRISTAUX DU SYSTÈME HEXAGONAL (1)

Prisme hexagonal, basé ou non (*m*, *pm*, fig. 136).

1, *Néphéline* *; **2,** *Milarite* *; **3,** *Béryl, Émeraude*; **4,** *Apatite*; **5,** *Pyrrhotine* *; **6,** *Pyromorphite*; **7,** *Mimétèse*; **8,** *Vanadinite* *.

1, Prismes aplatis très limpides, faisant nuage dans les acides; **2,** (pseudo-hexagonale), petits prismes allongés limpides; bouillonne au chalumeau; **3,** en prismes longs, souvent cannelés, de couleur variable (vert-émeraude, vert-clair, bleu, jaune, incolore), se distinguant de toutes les autres substances prismatiques par une beaucoup plus grande dureté; **4,** en cristaux souvent assez beaux, verts ou bruns, ne rayant pas le verre; **5,** lamelles jaunes, magnétiques; **6** et **7,** très fusibles, réact. du plomb, avec réact. de l'arsenic pour **7**; **8,** en petits prismes groupés d'un rouge vif ou d'un jaune mat, décrépite dans le tube.

Prisme, base et Protopyramide (fig. 139).

1, *Béryl, Émeraude*; **2,** *Apatite* verte et blanc mat.

Distinction facile par la dureté.

Prisme, Base, Proto- et Deutéropyramide, etc. (fig. 423).

Béryl, Émeraude.

Prisme court, avec bases et nombreuses modifications, dont une, hémiédrique, sur les angles (fig. 143).

Apatite.

Cristaux incolores, très limpides et d'un vif éclat, souvent implantés sur épidote et filaments verts d'asbeste.

III. — CRISTAUX DU SYSTÈME QUADRATIQUE

Prisme, avec ou sans base (*m*, *mp*, fig. 150).

1, *Apophyllite* *; **2,** *Idocrase*; **3,** *Gehlénite* *; **4,** *DIPYRE*; **5,** *Mélilite* *.

1. Incolore ou rosée, réact. 23 avec boursouflement, base nacrée; **2,** ordinairement brune ou verte, de vif éclat; **3,** prismes courts, sans éclat, presque infusibles; **4,** prismes longs, blanchâtres ou gris, engagés dans un calcaire et généralement sans sommets distincts; **5,** prismes courts, jaunâtres, faisant, comme **3,** gelée avec l'acide chlorhydrique, mais fusibles.

Proto- et Deutéroprisme avec base (mh^1p).

Idocrase.

1. Les prismes hexagonaux qui dérivent de la symétrie ternaire ne sont pas compris dans cette énumération. On les trouvera au système rhomboédrique.

Protoprisme et Protopyramide (fig. 154).

ZIRCON de l'Oural et de la Norvège, en petits cristaux gris jaunâtres ou bruns.

Proto- et Deutéroprisme, avec pointement.

Rutile.

Protoprisme, Protopyramide et base (fig. 153).

1, *Apophyllite*; **2**, *Phosgénite**.

1, Base nacrée ; **2**, forte réfringence, réact. du plomb.

Protoprisme, Deutéroprisme, Proto- et Deutéropyramide, Base (fig. 155, 156).

1, *Idocrase*; **2**, Rutile; **3**, *Cassitérite*.

2 et **3** se distinguent de **1** par leur grande densité et leur infusibilité; **3**, sur le charbon, donne un bouton d'étain. L'absence de clivages le distingue aussi de **2**.

Protoprisme et Deutéropyramide (fig. 428).

1, *Zircon*; **2**, *Apophyllite*; **3**, *Méionite**; **4**, *Wernérites*; **5**, *Cumengéite**.

1, Ordinairement rouge-hyacinthe, en petits cristaux brillants; **2**, blanche, réact. 23; **3**, incolore et vitreuse, facilement fusible; **4**, assez gros cristaux ternes; **5**, petits cristaux brillants, d'un bleu foncé, réact. du cuivre.

Octaèdre quadratique.

1° *Aplati.*

1, *Zircon*; **2**, *Idocrase*; **3**, MELLITE.

1. Infusible; **2**, fusible, brune et verte; **3**, extrêmement légère, combustible. Tous trois laissent généralement voir un rudiment du protoprisme.

2° *Aigu.*

1, ANATASE; **2**, *Scheelite*.

1, Petits cristaux le plus souvent noirs et à éclat métallique, parfois basés ou tronqués (fig. 481), sur gangue de petits cristaux brillants d'albite et de quartz; infusibles, inattaquables; **2**, assez gros cristaux jaune-miel, attaquables aux acides.

Octaèdre quadratique basé (fig. 630).

1, WULFÉNITE; **2**, *Mellite*.

1, Jaune ou rouge, cristaux le plus souvent tabulaires, réact. du plomb; **2**, légère et combustible.

Deutéroprisme, Protopyramide et Dioctaèdre (fig. 430).

Zircon.

Petits cristaux bruns, brillants.

Sphénoèdre (fig. 166).

Chalcopyrite.

Cristaux presque identiques avec le tétraèdre régulier, d'un jaune généralement chaud et doré. Réact. du fer et du cuivre.

Sphénoèdre direct avec son inverse.

Chalcopyrite.

Cristaux imitant l'octaèdre régulier.

IV. — CRISTAUX DU SYSTÈME RHOMBOÉDRIQUE

Rhomboèdre simple (fig. 491, 492, 494).

1, *CHABASIE*; **2**, *Calcite*; **3**, *Dolomie*; **4**, *Sidérose*; **5**, Cinabre*.

1, Petits rhomboèdres limpides, voisins du cube, réact. des zéolites; **2**, effervescence facile; **3**, effervescence moins facile, limpidité généralement moindre, réact. de la magnésie; **4**, de couleur blonde ou rougeâtre, réact. de la magnésie; **5**, rouge vif, grande réfringence, volatil.

Rhomboèdre et protoprisme (b^1e^2, fig. 498).

Calcite.

Variété dite en tête de clou; prisme souvent court (calcite dodécaédrique).

Birhomboèdre ($pe^1/_2$, fig. 201).

Quartz.

Incolore, enfumé ou améthyste. On aperçoit généralement un rudiment du prisme e^2.

Birhomboèdre et protoprisme ($pe^1/_2e^2$, fig. 202).

QUARTZ.

Hyalin, laiteux, enfumé, rouge-hyacinthe, jaune d'ocre.

Birhomboèdre et base ($pe^1/_2a^1$, fig. 566).

Oligiste.

Cristaux souvent très aplatis, formant des lames hexagonales très brillantes.

Rhomboèdre, Hémiprotoprisme, Deutéroprisme (p, b^1, $\frac{1}{2}e^2$, d^1, fig. 208).

Tourmaline.

Variété noire ou brune, souvent cannelée; $^1/_2e^2$ domine et donne à la section un aspect triangulaire (fig. 418). Quand le cristal laisse voir l'extrémité opposée à b^1, on y voit e^1 ou a^1.

Rhomboèdre, Deutéroprisme (fig. 200).

DIOPTASE

Petits cristaux d'un beau vert-émeraude, présentant souvent des traces de la forme hémiédrique $^1/_2d^3$ (fig. 619).

Prisme hexagonal simple (e^2 ou d^1), **avec ou sans base** a^1.

1, *Tourmaline*; **2**, *Corindon*; **3**, *Calcite*; **4**, Oligiste.

1, Tantôt très noire, tantôt incolore, rose (Rubellite) ou verdâtre, et pouvant être confondue avec le béryl, dont elle se distingue par une moindre dureté et aussi par réact. du bore et du fluor; **2**, en cristaux généralement peu limpides, basés, plus lourds et plus durs que le béryl, et pourvus de clivage; **3**, base nacrée, faces prismatiques vitreuses; effervescence; **4**, prismes courts noirs, poussière rouge.

Proto- et deutéroprismes (d^1 dominant), **avec rhomboèdres primitif et inverse**, etc. (fig. 426).

Phénacite *.

Deutéroprisme, avec rhomboèdre primitif, rhomboèdre inverse et divers scalénoèdres (fig. 622).

Pyrargyrite.

Fusible, poussière rouge, réact. de l'argent.

Scalénoèdres (fig. 173, 174).

Calcite.

Cristaux plus ou moins aigus, très souvent métastatiques (fig. 502, 503), effervescence facile.

Isocéloèdres, souvent avec prisme d^1 (fig. 134, 482).

1, *Corindon*; **2**, Calcite.

1, Très dur et inattaquable; **2**, rayée au canif, effervescente.

Rhomboèdres. Isocéloèdre (fig. 568).

Oligiste.

Cristaux noirs, vif éclat, souvent un peu irisés, poussière rouge.

Rhomboèdre basé (fig. 462, 513).

1, *Pennine* *; **2**, Calcite; **3**, Dolomie ferrifère (*TERUELITE*) *.

1, Verte, clivage basique (symétrie monoclinique); **2**, blanche, clivages rhomboédriques; **3**, petits cristaux noirs, à faces a^1 ternes.

Rhomboèdre pyramidé (fig. 505).

Calcite.

V. — CRISTAUX DU SYSTÈME RHOMBIQUE

Prisme basé (mp, fig. 214).

1, *ANDALOUSITE*; **2**, *Staurotide* (1); **3**, *Barytine.*

1, Prismes presque carrés, parfois transparents, rosés et de petite taille; plus souvent gros, opaques et enduits de séricite; **2**, prismes brun-rouge, de 110 degrés; **3**, cristaux blonds ou incolores, lourds, réact. du soufre.

Prisme, Brachypinacoïde et base ($mg^1 p$, fig. 224).

1, *Staurotide* (2); **2**, *Aragonite.*

1, Prismes allongés, rouge-brun, ordinairement associés au disthène dans le mica blanc soyeux; **2**, prismes transparents ou translucides, effervescents. Dans les deux cas, la forme simule un prisme hexagonal régulier.

Prisme, Brachypinacoïde et Brachydôme (mg^1e^1, fig. 488).

Aragonite.

Protoprisme, Macro- et Brachypinacoïde, Base, etc. (mh^1g^1p, etc., fig. 412).

1, *Cordiérite*; **2**, *PINITE.*

1, Cristaux noirâtres, dichroïques, sur la pyrite magnétique; **2**, cristaux ternes, intérieurement amorphes.

Prisme et brachydôme (fig. 559).

1, *Mispickel*; **2**, *Glaucodote* *.

Cristaux métalliques: d'un blanc voisin de celui de l'argent, imitant souvent un octaèdre régulier; **2**, distingué de **1** par la réact. du cobalt.

Prisme, macrodôme, base.

Staurotide (3).

Cristaux bruns, ternes, généralement munis de g^1 (p de l'ancienne notation).

1, 2. Dans l'hypothèse où l'on conserve l'orientation jusqu'ici admise par les auteurs.
3. Dans l'hypothèse où l'on adopte l'orientation proposée par Mallard.

Octaèdre rhombique (avec facettes subordonnées) (fig. 212).

1, *Soufre*; **2**, Cérusite.

Distinction très facile.

Octaèdre rhombique avec brachydôme et autres facettes.

1, *Soufre*; **2**, *Cérusite*; 3, Anglésite.

1, Jaune (fig. 536); **2**, lourde, très réfringente (fig. 592); **3** (fig. 594) se distingue de **2** par l'absence d'effervescence.

Prisme et octaèdre rhombique.

1, *MÉSOTYPE*; **2**, *Topaze.*

1, Incolore, très fusible, bouillonne au chalumeau; **2**, grande dureté, prisme cannelé.

Protoprisme, Brachyprisme, Protopyramide (fig. 420).

Topaze.

Même forme, avec Brachydôme et avec ou sans base (fig. 421, 422).

Topaze.

Brachypinacoïde dominant (fig. 594).

Cérusite.

Cristaux souvent groupés en éventail autour d'un même axe.

Base dominante.

Barytine (fig. 520).

Tablettes blanches nacrées, parfois bleues; grande densité.

Combinaison de Macrodôme et Brachydôme dominants (forme de cénotaphe), avec ou sans base (fig. 517, 519).

1, *Barytine*; **2**, *Célestine*; **3**, *Anhydrite*; **4**, *Mispickel*; **5**, *Anglésite.*

1, **2** et **5**, très lourdes; **1** et **2** se distinguent par les flammes, et **5** par réact. du plomb; **3**, à trois clivages rectangulaires; **4**, blanc d'argent un peu jaunâtre, à cannelures (fig. 560).

Combinaison de Macrodôme et Brachydôme en pseudoctaèdre aigu (fig. 557).

Marcasite.

Éclat spécial; souvent épigénisée en limonite.

Sphénoïde.

Soufre (fig. 213).

Cristaux hémimorphes, avec g^1 dominant.

CALAMINE (fig. 581).

VI. — CRISTAUX DU SYSTÈME MONOCLINIQUE

Forme pm (fig. 233) **ou** ma^1.

Adulaire.

Cristaux transparents ou enduits de chlorite, d'apparence rhomboédrique, striés sur la base, rayant le verre.

Forme pmg^1, **généralement avec un hémiorthodôme** (fig. 384).

Orthose.

Forme pg^1 dominante, avec prisme et hémidôme subordonnés (fig. 386).

Orthose.

Cristaux généralement rose-clair et opaques, apparence de prismes carrés allongés, à pointements dyssymétriques.

Forme mg^1 avec Hémipyramide (fig. 524).

GYPSE.

Limpide, bien développé, rayé à l'ongle.

Forme mg^1 avec Hémipyramide et Base (fig. 440).

Amphibole-Hornblende.

Cristaux noirs, non métalliques, section hexagonale assez régulière.

Forme mh^1g^1 avec Hémipyramide (fig. 434).

1, *Diopside*; **2**, *AUGITE.*

1, Cristaux transparents verdâtres ; **2**, Cristaux noirs, se distinguant de ceux de la hornblende du type précédent, d'abord par leur section octogonale, ensuite par le biseau substitué à un pointement triple.

Pinacoïdes h^1 et g^1 dominants, avec Hémipyramides, Hémidômes, etc. (fig. 433).

1, *Diopside*; **2**, *ÆGIRINE**.

Donneraient, sans la dyssymétrie du pointement, l'impression d'un prisme quadratique ou plutôt rectangulaire ; **1**, translucide, verdâtre ; **2**, opaque, en grands cristaux vert-noirâtres.

Prisme, Base, Protohémipyramide (fig. 618).

CHESSYLITE.

Cristaux d'un beau bleu foncé, d'apparence générale rhomboédrique.

Combinaison d'Hémipyramides, donnant un pseudo-octaèdre aigu (fig. 530).

*KLAPROTHINE *.*

Cristaux d'un bleu de ciel généralement mat, réact. du phosphore et de l'alumine.

Hémipyramide dominante, avec dômes subordonnés, figurant un toit aplati.

Sphène.

Cristaux bruns de la variété Lédérite.

VII. — CRISTAUX DU SYSTÈME TRICLINIQUE

Prisme fondamental, avec modifications sur les arêtes (fig. 419).

1, *AXINITE*; **2**, *CYANOSE.*

1, Cristaux très coupants, brun-violacé, striés, translucides ; **2**, cristaux d'un beau bleu, solubles.

Prisme modifié par g^1 et un hémidôme (fig. 398).

ALBITE, VAR. PÉRICLINE.

Cristaux blanc de lait, souvent revêtus de chlorite, rayant le verre.

VIII. — MACLES

Macle des spinelles (fig. 318, 484, 590).

1, *Spinelle*; **2**, *Magnétite*; **3**, *Blende*; **4**, *Galène*; **5**, *Diamant**.

1, Rose ou noir non métallique, non magnétique; **2**, noir métallique, magnétique; **3**, réact. du zinc; **4**, couleur gris-bleu, réact. du plomb; **5**, grande dureté.

Macle de deux cubes (fig. 350).

1, *Fluorine*; **2**, *Diamant**.

Distinction facile.

Macle de la croix de fer (fig. 536).

Pyrite.

Le plus souvent rouillée et un peu noircie à la surface.

Macle en visière ((fig. 319, 587).

Cassitérite.

Cristaux bruns ou noirs, pesants, réact. de l'étain.

Macle en genou (fig. 479).

1, *Rutile*; **2**, *Cassitérite*.

1, Métallique, sans changement au chalumeau, clivable; **2**, plus dense, non métallique et donnant un bouton d'étain.

Macle en cœur (fig. 511, 480).

1, Calcite; **2**, Rutile.

Distinction immédiate.

Macle en papillon (fig. 507).

Calcite.

Macle en croix grecque (fig. 345).

1, *Staurotide* (*Croisette*); **2**, *Harmotome*.

1, Dure, opaque, brune; **2**, blanche; réact. 23; réact. de la baryte.

Macle en croix de Saint-André (fig. 346).

Staurotide.

Macle à charnière multiple.

Cérusite.

Lames blanches, éclatantes, groupées autour d'un même axe. Effervescence et réact. de plomb.

Macle en chevron (fig. 326, 327).

1, *Augite*; **2**, *Hornblende-Basaltine*; **3**, *Gypse*.

1, **2**, Petits cristaux noirs, opaques; **1**, à section octogonale; **2**, à section hexagonale; **3**, transparents, rayés à l'ongle.

Macle en fer de lance (fig. 527).

Gypse.

Cristaux blonds, un clivage très facile; rayés à l'ongle.

Macle en gouttière (fig. 332).

Albite.

Petits cristaux limpides, d'un vif éclat.

IX. — MINÉRAUX EN CRISTAUX DÉFINIS, CLASSÉS D'APRÈS LA COULEUR

Cristaux violets.

1, AMÉTHYSTE ; **2**, *Lépidolite* ; **3**, AXINITE ; **4**, Diaspore* ; **5**, Apatite ; **6**, ***Fluorine***.

1, En cristaux pyramidés, rayant le verre ; **2**, en paillettes brillantes, lilas-clair ; **3**, en cristaux très coupants, tricliniques, transparents ; **4**, cristaux laminaires rhombiques, durs, infusibles, réact. de l'alumine, réact. 23 ; **5**, en prismes courts hexagonaux, transparents, de faible dureté ; **6**, en cubes, souvent fluorescents.

Cristaux d'un bleu foncé.

1, *Haüyne* ; **2**, Tourmaline (*INDICOLITE*) ; **3**, *KLAPROTHINE* ; **4**, *VIVIANITE* * ; **5**, *CHESSYLITE* ; **6**, *CYANOSE* ; **7**, *BOLÉITE* * ; **8**, *CUMENGÉITE* *.

1, Petits rhombododécaèdres ; **2**, cristaux de symétrie ternaire ; **3**, pseudo-octaèdres aigus, mats, réact. 23 ; **4**, cristaux transparents, tendres, très clivables ; **5**, cristaux opaques, d'un beau bleu, effervescents ; **6**, cristaux tricliniques, solubles ; **7**, en cubes ; **8**, de symétrie quadratique nette.

Cristaux d'un bleu clair.

1, *Cordiérite* * ; **2**, TOPAZE DE SIBÉRIE ; **3**, *Aigue-Marine* ; **4**, *Disthène* ; **5**, *CYPRINE* * ; **6**, *SAPHIR* ; **7**, Barytine ; **8**, *Célestine* ; **9**, Anhydrite.

1, Teinte peu franche ; dichroïsme marqué ; grains cristallins plutôt que cristaux ; **2**, teinte bleue très pâle ; symétrie rhombique évidente, base accusée par clivage facile ; **3**, prismes cannelés, souvent très gros ; grande dureté ; **4**, cristaux plats, allongés, limpides et brillants, à section presque rectangulaire, moins durs que **3** ; **5**, grains cristallins fusibles ; **6**, plus dur qus tous les autres ; **7**, en cristaux aplatis, rhombiques, réact. du soufre ; **8**, en fibres ou en cristaux, à distinguer de **7** par la flamme ; **9**, à trois clivages rectangulaires inégaux.

Cristaux d'un vert franc (type Emeraude).

1, *AMAZONITE* ; **2**, *HIDDÉNITE* * ; **3**, *FUCHSITE* * ; **4**, *ÉMERAUDE* ; **5**, *OUWAROWITE* * ; **6**, *CHALCOLITE* ; **7**, ***Adamine*** * ; **8**, *DIOPTASE* ; **9**, *CHALCOPHYLLITE* *.

1, Clivage net, rayant le verre ; **2**, cristaux monocliniques, réact. du lithium ; **3**, mica d'un vert-émeraude ; **4**, couleur caractéristique, symétrie hexagonale, grande dureté ; **5**, en petits rhombododécaèdres ; **6**, paillettes minces, fusibles, carrées, réact. du phosphore et du cuivre ; **7**, petits cristaux arrondis très brillants, réact. de l'arsenic et du zinc ; **8**, prismes courts avec rhomboèdre ; nuance verte un peu mêlée de bleu ; réact. du cuivre ; **9**, petites lames hexagonales à clivage basique (mica cuivreux) ; réact. du cuivre et de l arsenic.

Cristaux d'un vert mélangé.

1° *Vert foncé.*

1, *MEROXÈNE* * ; **2**, Tourmaline ; **3**, *FASSAITE* * ; **4**, *DIALLAGE* ; **5**, *ACTINOTE* ; **6**, ***Hornblende*** ; **7**, *Epidote* ; **8**, *Idocrase* ; **9**, *PENNINE* * ; **10**, *CLINOCHLORE* ; **11**, *CHLORITOÏDE* ; **12**, *ALEXANDRITE* * ; **13**, Apatite ; **14**, *Pharmacosidérite* * ; **15**, *MALACHITE* ; **16**, *OLIVÉNITE* * ; **17**, *LIBETHÉNITE* * ; **18**, *ATACAMITE*.

1, Lamelles hexagonales, flexibles et élastiques ; **2**, prismes cannelés transparents, durs ; **3**, cristaux opaques, à section souvent rectangulaire et pointement monoclinique ; **4**, lames plutôt que cristaux, généralement un peu courbes, reflets chatoyants jaunâtres ;

5, prismes longs, d'un beau vert foncé, translucides, à section hexagonale, fragiles et engagés dans un talc blanc; **6**, masses laminaires et fibreuses à deux clivages se coupant sous un angle de 124 degrés; **7**, beaux cristaux de vif éclat, vert-foncé, à cassure vert-bouteille et vert-pistache, symétrie monoclinique, clivage basique; **8**, prisme octogonal mh^1g^1, vert-bouteille foncé, terminé d'ordinaire par un octaèdre tronqué; **9**, cristaux rhomboédriques d'apparence, à faces luisantes vert-foncé, tronqués par une base triangulaire vert-clair terne; **10**, lamelles hexagonales flexibles, non élastiques, d'un vert-poireau inégal; **11**, mêmes apparences que **10**, mais en lamelles cassantes; **12**, rosettes formées par groupement, vert-foncé par réflexion, rouge-framboise à la lumière transmise; **13**, gros cristaux hexagonaux, fendillés en tous sens, de faible dureté, attaquables; **14**, petits cristaux cubiques en geodes; **15**, **16**, **17** et **18**, offrant la réaction du cuivre; **15**, cristaux rares, vert-foncé, courts, effervescents; **16**, petits cristaux éclatants, vert-olive foncé, réact. de l'arsenic; **17**, petits cristaux vert-sombre, réact. du phosphore; **18**, petits cristaux vert-émeraude foncé, réact. du chlore, solubles dans l'ammoniaque (**16**, **17** et **18**, généralement en enduits de cristaux groupés).

2° *Vert clair.*

1, Tourmaline; **2**, *Béryl*; **3**, *DIOPSIDE*; **4**, *PERIDOT*; **5**, *PREHNITE* *; **6**, Grossulaire; **7**, *Idocrase*; **8**, *TALC*; **9**, *ANTIGORITE*; **10**, *CHLOROSPINELLE* *; **11**, *SCORODITE* *; **12**, Pyromorphite.

1, Petites colonnes hexagonales, vert-clair ou vert-jaunâtre, souvent colorées en rose à une extrémité, réact. du bore et du fluor; **2**, prismes hexagonaux vert-clair ou vert-bleuâtre, striés en longs, très durs; **3**, cristaux transparents, monocliniques, à section d'apparence rectangulaire, sur grenat rouge et clinochlore; **4**, cristaux et plus ordinairement grains cristallins durs, les uns vert-clair (chrysolite), les autres couleur d'huile d'olive (olivine); **5**, cristaux d'apparence rhomboédrique, souvent groupés en masses mamelonnées vert d'herbe, de vif éclat vitreux, réact. 23; **6**, trapézoèdres ou rhombododécaèdres presque opaques, tournant au jaunâtre, fusibles; **7**, cristaux quadratiques à pointement tronqué, vert-jaunâtre clair; **8**, lamelles ondulées, éclat et toucher gras, rayées à l'ongle, d'un vert-poireau argenté; **9**, cristaux d'un vert-clair mat, grisâtre, isolés par suite de l'existence de trois clivages rectangulaires, réact. 23, coupés au canif; **10**, petits octaèdres réguliers; **11**, petits cristaux d'un vert un peu bleuâtre, ordinairement en géodes sur quartz avec taches d'un vert sale; réact. de l'arsenic et du fer; **12**, petits prismes hexagonaux opaques, vert d'herbe, lourds, très fusibles; réact. du plomb.

Il faut ajouter à cette liste les cristaux, octaédriques ou rhombododécaédriques, de cuprite, quand ils sont recouverts d'un enduit vert mat de malachite.

Cristaux jaunes, non métalliques.

1° *Jaune franc.*

1, *Serpentine noble*; **2**, *CHRYSOTILE*; **3**, *URANITE*; **4**, *SOUFRE*; **5**, *Mimétèse.*

1, Cristaux jaune-mat, sectiles, pseudomorphiques de péridot; **2**, fibres jaune-d'or, soyeuses; **3**, paillettes jaune-clair, presque quadratiques, réact. 23; **4**, cristaux translucides, combustibles; **5**, petits prismes hexagonaux fusibles; réact. du plomb et de l'arsenic.

2° *Jaune orangé.*

1, *ORANGITE* *; **2**, *ORPIMENT*; **3**, Pyromorphite.

1, Cristaux quadratiques, infusibles; **2**, lamelles tendres, volatiles, à reflets rougeâtres dus au réalgar; **3**, petits prismes hexagonaux fusibles, réact. du phosphore et du plomb.

3° *Jaune-miel et nuance blonde.*

1, *TOPAZE DU BRÉSIL*; **2**, Béryl; **3**, *MÉLINOPHANE* *; **4**, *HELVINE* *; **5**, *Chondrodite* *; **6**, Calcite; **7**, Barytine; **8**, Gypse; **9**, Apatite; **10**, *SCHEELITE*; **11**, Fluorine; **12**, Soufre (var.); **13**, *SIDEROSE*; **14**, Blende; **15**, *Wulfénite* (*MELINOSE*); **16**, *MELLITE.*

1, Cristaux rhombiques à faces prismatiques striées, pointement pyramidal, clivage

basique; **2**, prismes hexagonaux très durs, souvent groupés; **3**, octaèdres quadratiques obtus, fusibles avec bouillonnement; **4**, petits tetraèdres, à faces souvent courbes; **5**, cristaux compliqués ou plutôt grains, infusibles, souvent dans le calcaire; **6**, rhomboèdres ou scalenoèdres rayés au canif, effervescents; **7**, cristaux lourds, en cénotaphes rhombiques, clivage basique; **8**, cristaux ordinairement en fer de lance, rayés à l'ongle; **9**, prismes hexagonaux modifiés, souvent en cristaux squelettes, ne rayant pas le verre; **10**, octaedres quadratiques généralement aigus, très denses; **11**, cubes transparents, souvent mouchetés de pyrite de cuivre; **12**, masses à éclat résineux, combustibles, aux formes extérieures imitant la calcite blonde; **13**, rhomboèdres souvent lenticulaires, effervescents, réact. du fer; **14**, cristaux transparents, d'éclat adamantin, six clivages, réact. du zinc; **15**, tablettes quadratiques fusibles, réact. du plomb; **16**, octaèdres quadratiques légers, combustibles, réaction de l'alumine.

4° *Jaune verdâtre.*

1, *Sphène*; **2**, Béryl; **3**, *Olivine*.

1, Petits cristaux, brillants et limpides, maclés en forme de coins pointus, sur gangue de chlorite verte; **2**, prismes hexagonaux durs; **3**, grains cristallins plutôt que cristaux, disséminés dans les basaltes.

Cristaux jaunes métalliques.

1, *PYRITE*; **2**, *MARCASITE*; **3**, *PYRRHOTINE*; **4**, *MILLÉRITE*; **5**, *BISMUTH*; **6**, *CHALCOPYRITE*.

1, Jaune-laiton, symétrie cubique; **2**, jaune-verdâtre livide, symétrie rhombique, fréquemment efflorescente; **3**, lamelles hexagonales (rares), d'un jaune-bronze tirant sur le brun-tombac, magnétiques; **4**, aiguilles fines, couleur de laiton, solubles en vert dans l'eau regale; **5**, jaune de bronze après exposition à l'air, lamelles se succédant en escalier, très fusible; **6**, symétrie sphénoédrique, jaune très doré, souvent irisé, réact. du fer et du cuivre.

Cristaux rouges à éclat non métallique.

1° *D'un rouge vif franc.*

1, *QUARTZ HYACINTHE*; **2**, *Zircon*; **3**, *Grossulaire*; **4**, Stilbite; **5**, Heulandite; **6**, *RUBIS*; **7**, *SPINELLE D'ORIENT*; **8**, *RÉALGAR*; **9**, *CROCOÏSE* *; **10**, Wulfénite; **11**, *Vanadinite* *; **12**, *CHALCOTRICHITE*; **13**, *Cinabre*.

1, Petits prismes bipyramidés rouge-sang, opaques; **2**, petits cristaux quadratiques d'un vif éclat, rouge-hyacinthe, arêtes ordinairement adoucies; **3**, petits trapézoèdres avec rhombododécaèdre, transparents, fréquemment accompagnés de chlorure et de diopside, fusibles; **4** et **5**, petits cristaux aplatis d'un rouge de brique, opaques, réact. 23, en géodes dans une roche basaltique; **6**, formes hexagonales; dureté caractéristique; **7**, en octaèdres réguliers; **8**, prismes courts, d'un rouge tirant sur l'orange, éclat résineux, volatil; **9**, petits cristaux rouge-hyacinthe, sectiles, réact. du plomb, perle vert-émeraude avec le sel de phosphore; **10**, tables quadratiques, vif éclat adamantin; réact. du plomb, cassante, plus lourde que **9**; **11**, prismes hexagonaux brillants, réact. du plomb; **12**, aiguilles (cubes allongés) rouge-cochenille, réact. du cuivre; **13**, très vif éclat adamantin, volatil, réact. du mercure.

2° *D'un rouge foncé.*

1, *ALMANDINE*; **2**, *PYROPE*; **3**, *Chondrodite* *; **4**, *Vanadinite* *.

1, Dodécaèdres, souvent assez gros et modifiés par trapézoèdre, fusibles; **2**, mêmes formes, mais infusibles et réact. de magnésie; **3**, cristaux compliqués, opaques, réact. du fluor; **4**, prismes hexagonaux courts, réact. du plomb.

3° *D'un brun rougeâtre.*

1, Mica (*Biotite* et *Phlogopite*); **2**, *SPHÈNE (LEDÉRITE)*; **3**, Tourmaline; **4**, *Zircon*; **5**, Hypersthène *; **6**, Péridot; **7**, *Grenats*; **8**, *Idocrase*; **9**, *PYROCHLORE* *; **10**, *Cassitérite*; **11**, *Pyromorphite*; **12**, *CAMPYLITE* *; **13**, Mimétèse.

1, Paillettes caractéristiques; **2**, cristaux en forme de toit aplati; **3**, symétrie ternaire,

réact. du bore et du fluor : **4**, cristaux quadratiques pyramidés, éclat résineux : **5**, cristaux aciculaires dans des géodes volcaniques ; **6**, cristaux opaques, à symétrie nettement rhombique ; **7**, formes caractéristiques des grenats, rhombododécaèdres dominants ; **8**, formes quadratiques avec octaèdres surbaissés ; **9**, petits octaèdres bruns, d'éclat résineux, infusibles ; **10**, cristaux quadratiques, de vif éclat vitreux, infusibles, pas de clivages nets, réact. de l'étain ; **11**, prismes hexagonaux très lourds, fusibles, réact. du plomb ; **12**, presque toujours en forme de barillets à éclat résineux ; **13**, réact. du plomb et de l'arsenic.

Cristaux rouges à éclat métallique.

1, *RUTILE* ; **2**, *CUPRITE (ZIGUÉLINE)* ; **3**, *PYRARGYRITE* ; **4**, *PROUSTITE* *.

1, Gros cristaux à clivages nets, fond noir avec reflets rutilants, sans changement au chalumeau, ou aiguilles de mêmes reflets, dans le quartz ; **2**, octaèdres rouge-foncé, réact. du cuivre ; **3**, reflets rouges fugitifs dans cristaux noirs ternaires, rouge-foncé par transparence, réact. de l'argent ; **4**, cristaux aciculaires, vermillon, à reflets semi-métalliques combinés avec vif éclat adamantin, réact. d'arsenic et d'argent.

Cristaux roses.

1, *Orthose* (var. *PEGMATOLITE*) et Microcline ; **2**, *Lépidolite* ; **3**, *Pétalite* * ; **4**, *Rubellite* ; **5**, Analcime ; **6**, Fluorine ; **7**, *DIALOGITE (RHODOCHROSITE)* * ; **8**, *RHODONITE* ; **9**, *TROOSTITE* * ; **10**, Adamine *.

1, Gros cristaux, rose-chair plus ou moins pur, à section carrée, symétrie monoclinique ; **2**, paillettes brillantes argentées, réact. du lithium ; **3**, lames d'apparence feldspathique, même réact. ; **4**, prismes hexagonaux, ou de contour plutôt triangulaire, souvent groupés en faisceaux radiés ; **5**, trapézoèdres rose-chair, clairs, bouillonnant au chalumeau, réact. 23 ; **6**, octaèdres réguliers translucides, clivage octaédrique ; **7** rhomboèdres clivables, effervescents ; **8**, cristaux ternes, rose-chair, rayant le verre ; **9**, cristaux prismatiques ternaires, réact. du zinc et du manganèse ; **10**, petits cristaux rhombiques, groupés en croûtes, réact. de l'arsenic et du zinc.

Cristaux noirs.

1° *A éclat non métallique.*

1, *QUARTZ ENFUMÉ* ; **2**, *Biotite* (*LEPIDOMÉLANE*) ; **3**, *Tourmaline* ; **4**, *Augite* ; **5**, *ÆGIRINE* * ; **6**, *Hornblende* (*BASALTINE*) ; **7**, *PYRÉNÉITE* ; **8**, *MÉLANITE* ; **9**, *ILVAÏTE* * ; **10**, *PLÉONASTE* ; **11**, Dolomie ferrifère (*TERUELITE*) * ; **12**, Blende ; **13**, Cassitérite ; **14**, *DIAMANT NOIR* *.

1, Cristaux ternaires en prismes hexagonaux pyramidés ou en isocéloèdres apparents, le plus souvent translucides ; **2**, paillettes hexagonales à contours le plus souvent irréguliers ; propriétés caractéristiques des micas ; **3**, prismes généralement cannelés, opaques, à section plutôt triangulaire, hémimorphes, noir-d'encre ; **4**, prismes courts à section octogonale, terminés par un dôme incliné, généralement mats ; **5**, prismes noirs allongés, section de forme carrée ; **6** prismes courts à section d'apparence hexagonale, pointement triple ; **7**, petits dodécaèdres noirs, engagés dans un calcaire noir ; **8**, dodécaèdres noirs, différant des précédents par l'absence d'alumine ; **9**, prismes noirs rhombiques, striés, à pointements pyramidaux, fusibles ; **10**, octaèdres réguliers ; **11**, rhomboèdres basés, effervescents ; **12**, cristaux brunâtres à symétrie cubique, réact. du zinc ; **13**, cristaux brillants, symétrie quadratique, très souvent avec le bec d'étain ; **14**, éclat et dureté caractéristiques.

On peut ajouter à cette liste tous les silicates boréens, caractérisés par leur éclat résineux.

2° *A éclat métallique.*

1, *ANATASE* ; **2**, *Arsenic* ; **3**, *WOLFRAM* ; **4**, *HAUERITE* * ; **5**, *PYROLUSITE* ; **6**, *BRAUNITE* * ; **7**, *ACERDÈSE* ; **8**, *MAGNÉTITE* ; **9**, *Oligiste* ; **10**, *MARTITE* ; **11**, *ILMÉNITE* * ; **12**, *Blende* ; **13**, *FRANKLINITE* ; **14**, Galène ; **15**, *CHALCOSINE* ; **16**, *SCHWATZITE* * ; **17**, *ARGYRITE* ; **18**, *STÉPHANITE* * ; **19**, *Graphite*.

1, Petits octaèdres quadratiques aigus ; **2**, petits rhomboèdres groupés en boules ; **3**, gros

cristaux très clivables, lourds, généralement dans le quartz; **4**, **5**, **6**, **7**, avec réact. du manganèse: **4**, octaèdres et cubo-octaèdres, avec réact. du soufre; **5**, en petits prismes et aiguilles dégageant de l'oxygène: **6**, petits octaèdres quadratiques; **7**, prismes noirâtres cannelés, réact. 23; **8**, octaèdres ou rhombododécaèdres noir de fer, magnétiques: **9**, cristaux d'un très vif éclat, symétrie rhomboédrique, souvent irisés, poussière rouge: **10**, octaèdres réguliers, non magnétiques, poussière rouge; **11**, cristaux semblables à l'oligiste; réact. du titane; **12**, cristaux de symétrie cubique, brillants, réact. du soufre et du zinc; **13**, octaèdres réguliers: souvent avec arêtes abattues, moins magnétiques que **8**, réact. du zinc; **14**, cubo-octaèdres, rhombododécaèdres et octaèdres noir-bleuâtre, très denses, à trois clivages cubiques; **15**, cristaux aplatis d'apparence hexagonale, sectiles; **16**, rhombododécaèdres ternes avec tétraèdre, réact. du cuivre et du mercure; **17**, cristaux cubiques sectiles, tendance au gris de plomb, réact. de l'argent; **18**, cristaux d'un noir-bleuâtre, imitant la symétrie hexagonale, fragiles, réact. de l'argent, du soufre et de l'antimoine; **19**, paillettes hexagonales, infusibles, combustibles.

Cristaux d'un blanc d'argent.

1° *A éclat non métallique.*

1, *Muscovite*; **2**, *Lépidolite*; **3**, *Talc.*

1, Paillettes caractéristiques, de symétrie apparente hexagonale; **2**, paillettes inclinant au lilas, réact. du lithium; **3**, paillettes courbes, rayées à l'ongle, d'éclat gras et nacré, verdâtres en masse.

2° *A éclat métallique.*

1, *ANTIMOINE*; **2**, *Mispickel*; **3**, *Smaltine**; **4**, *COBALTINE*; **5**, *ULLMANNITE**; **6**, *ARGENT NATIF*; **7**, *AMALGAME**; **8**, *Sylvanite**.

1, Cristaux groupés, réact. d'antimoine; **2**, tire sur le jaune, symétrie rhombique, réact. de l'arsenic et du fer; **3**, blanc d'étain, symétrie cubique, clivage octaédrique, sublimé d'arsenic et réact. du cobalt; **4**, symétrie cubique avec hémiédrie, clivage cubique, teinte légèrement rosée par altération; sublimé de sulfure d'arsenic et réact. du cobalt; **5**, cristaux cubiques ou tétraédriques, réact. du bismuth et de l'antimoine; **6**, couleur caractéristique; **7**, symétrie cubique, réact. du mercure; **8**, inclinant au gris d'acier, petits cristaux rhombiques groupés, réact. de l'or et du tellure.

Cristaux de couleur grise.

1° *A éclat non métallique.*

1, *Trémolite*; **2**, *ANTHOPHYLLITE**; **3**, *SILLIMANITE*; **4**, Disthène; **5**, *Zoïsite**; **6**, *Exitèle.*

1, Prismes monocliniques, à clivages faisant un angle de 124°, fusibles; **2**, prismes ou fibres rhombiques, éclat soyeux; **3** et **4**, infusibles, en agrégats de prismes allongés; **3**, rhombique; **4**, triclinique; **5**, petits prismes groupés en faisceaux fusibles, réact, 23; **6**, petites aiguilles en faisceaux rayonnants, presque blanc d'argent, partiellement volatiles, réact. de l'antimoine.

2° *A éclat métallique.*

1, *STIBINE*; **2**, *MOLYBDÉNITE*; **3**, *GALÈNE*; **4**, *BOURNONITE**; **5**, *PANABASE*; **6**, *PYRARGYRITE*; **7**, *NAGYAGITE**.

1, cristaux rhombiques gris de plomb, souvent aplatis, un peu irisés et bleuis par places, remarquablement fusibles; **2**, cristaux en tables hexagonales (très rares), gris de plomb bleuâtre, trait verdâtre, sectiles, infusibles; **3**, octaèdres, cubo-octaèdres, etc., à trois clivages cubiques, grande densité; **4**, cristaux rhombiques gris-d'acier, maclés en pignons d'engrenage; réact. du fer et du cuivre; **5**, tétraèdres simples ou modifiés, gris d'acier souvent foncé, réact. de cuivre, antimoine; **6**, cristaux ternaires gris de plomb, reflets et poussière rouges; **7**, lamelles courbes ou cristaux plats, gris de plomb brillant, réact. d'or et de tellure.

Cristaux le plus souvent incolores et transparents.

1, *Quartz hyalin*; **2**, *Adulaire*; **3**, *ALBITE EN GOUTTIÈRE*; **4**, *Anorthite**; **5**, *Néphé-*

line *; **6**, *Phénacite* *; **7**, *Méïonite* *; **8**, *Brucite* *; **9**, *Boracite*; **10**, *Aragonite*; **11**, *Calcite* (*SPATH D'ISLANDE*); **12**, *Gypse*; **13**, *SENARMONTITE* *; **14**, *Smithsonite* *; **15**, *Calamine*; **16**, *Cérusite*; **17**, *Anglésite*; **18**, *Diamant* * (En outre, la presque totalité des Zéolites).

1, Toujours reconnaissable à sa cristallisation; **2**, cristaux assez gros, aux faces g^1 le plus souvent enduites de chlorite; **3**, petits cristaux d'éclat vitreux prononcé, assemblés par deux avec gouttière; **4**, petits cristaux très limpides et riches en facettes, dans les géodes d'une roche à mica vert du Vésuve; **5**, petits prismes hexagonaux courts, devenant nuageux dans les acides; **6**, cristaux assez analogues à ceux du quartz, mais coiffés par la combinaison du rhomboèdre et de son inverse; **6**, prismes quadratiques à pointement de deutéro-pyramide, fusibles; **8**, cristaux aplatis, sectiles, très clivables, éclat nacré ou cireux, infusibles; **9**, forme cubique généralement dominante, toujours avec indications tétraédriques; réact. du bore; **10**, effervescence, éparpillement au chalumeau, symétrie rhombique pseudo-hexagonale; **11**, effervescence facile, trois clivages, anneaux colorés, double réfraction visible; **12**, symétrie monoclinique, rayé à l'ongle, clivages inégaux; **13**, octaèdres se ternissant à l'air, volatils; **14**, petits cristaux brillants, effervescents, réact. du zinc; **15**, petits cristaux aplatis, brillants, hémimorphes; **16**, cristaux très réfringents, lourds et réact. du plomb avec effervescence; **17**, moins adamantins que **16**, et non effervescents; réact. du soufre et du plomb; **18**, éclat, dureté et formes caractéristiques.

Cristaux incolores par exception.

1, Tourmaline; **2**, Topaze; **3**, Béryl; **4**, Barytine; **5**, Célestine; **6**, Apatite; **7**, Fluorine; **8**, Adamine.

1 Colonnes hexagonales, réact. du bore et du fluor, souvent avec une extrémité colorée; **2**, symétrie rhombique nette, clivage basique; **3**, colonnes hexagonales plus dures que **1**; **4**, cristaux rhombiques lourds, réact. de la baryte; **5**, cristaux semblables à **4**, flamme de la strontiane; **6**, cristaux hexagonaux aplatis, riches en facettes, avec hémiédrie; vif éclat, ordinairement en compagnie d'épidote et de byssolite; **7**, cubes, rayés au canif, ou octaèdres, clivage octaédrique; **8**, petits cristaux de vif éclat, réact. de l'arsenic et du zinc.

Cristaux habituellement ou fréquemment d'un blanc laiteux.

1, *PÉRICLINE*; **2**, *TRÉMOLITE*; **3**, *Analcime*; **4**, *Stilbite*; **5**, *Apophyllite*; **6**, *HARMOTOME*; **7**, *LAUMONTITE*; **8**, *Dipyre*; **9**, *WITHÉRITE*; **10**, *STRONTIANITE*; **11**, *Calcite*; **12**, *Dolomie*; **13**, *APATITE DE SNARUM*.

1, Cristaux monocliniques, allongés suivant ph^1, striés; **2**, cristaux et fibres d'un blanc à éclat soyeux, rudes au toucher; **3**, trapézoèdres, réact. 23, souvent tendance à la nuance rosée; **4**, cristaux souvent en faisceaux, avec la direction g^1 très nacrée, taillée en losange épointé; **5**, cristaux quadratiques, à la base nacrée et étoilée; **6**, cristaux maclés en croix grecque; **7**, cristaux efflorescents à l'air sec; réact 23; **8**, prismes allongés, section carrée, dans un calcaire; **9**, cristaux rhombiques, pyramidés, lourds, effervescents; **10**, baguettes cristallines groupées, se distinguant de **9** par la flamme; **11**, clivages rhomboédriques, effervescence immédiate; **12**, faces généralement courbes, rhomboèdre primitif; **13**, gros prismes hexagonaux blanc-mat, couronnés par protopyramide et base.

X. — DÉTERMINATION DES MINÉRAUX COMPACTS, OU DES MASSES CRISTALLINES, SANS FORMES NETTES, RANGÉS D'APRÈS LA COULEUR

A. — Minéraux a éclat non métallique.

Minéraux violets.

VIOLANE *; en aiguilles ou lamelles violet noirâtre, réact. de manganèse.

Minéraux d'un bleu foncé.

1, *LAPIS-LAZULI OUTREMER*; 2, Sodalite *; 3, *GLAUCOPHANE* *; 4, *CROCIDOLITE* *; 5, *DUMORTIÉRITE* *.

1, Magnifique couleur, veines de pyrite fréquentes; 2, masses lamellaires fusibles; 3, masses fibreuses, fusibles; 4, fibres soyeuses asbestiformes, aux reflets chatoyants; 5, agrégats fibreux, bleu de cobalt, infusible.

Minéraux d'un bleu clair.

1, Calcédoine; 2, *Allophane*; 3, *TURQUOISE*; 4, Buratite *.

1, Nuageuse, dure; 2, masses mamelonnées translucides, bleu-verdâtre, réact. 23, réact. du cuivre; 3, petits rognons bleu-clair, noircissant au feu, réact du phosphore et du cuivre; 4, fibres effervescentes; réact. du cuivre.

Minéraux verts.

1, *HELIOTROPE*; 2, *PRASE*; 3, *JADEITE* *; 4, *ACTINOTE, SMARAGDITE* *; 5, *Asbeste*; 6, *Hornblende des roches*; 7, *NEPHRITE*; 8, *CHLORITE (RIPIDOLITE)*; 9, *Talc*; 10, Stéatite; 11, *WILLIAMSITE* *; 12, *BASTITE* *; 13, *SERPENTINE COMMUNE*; 14, *CHROMOCRE*; 15, *NOUMÉITE*; 16; *MALACHITE*; 17, *Buratite* *; 18, *CHRYSOCOLLE* *.

1, Vert-foncé, à taches rouge-sang; 2, vert-poireau, rayant le verre comme 1; 3, vert parfois émeraude, fusible; 4, fibres-rayonnées, vert-d'herbe, éclat soyeux; 5, fibres soyeuses, hydratation de 4; 6, fibres vert-foncé, habituellement groupées en agrégats à éléments parallèles; 7, rognons durs, vert-franc; 8, petites écailles vert-foncé, rudes au toucher, non élastiques, habituellement accompagnées de magnétite; 9, 10, masses blanc-verdâtre, sectiles, au toucher très gras; 11, masses d'un vert très cru, translucides, sectiles; 12, lames planes présentant, sous forme de taches disséminées, des reflets bronzés (*Schillerspath*); 13, masses d'un vert-noir très foncé, parfois à reflets rougeâtres, tendres, ordinairement parsemées de lamelles de bronzite; 14, enduits vert-pomme, généralement ternes; 15, masses d'un vert franc, réact. du nickel; 16, fibres soyeuses ou masses mamelonnées à nombreuses couches concentriques, effervescentes, fusibles, raéct. du cuivre; 17, fibres vert-pâle, nacrées, effervescentes, réact. de cuivre et de zinc; 18, masses compactes, d'un vert à tendance bleuâtre, infusibles, réact. du cuivre.

Minéraux jaunes.

1, *SILEX BLOND*; 2, Résinite; 3, *Serpentine noble*; 4, *MASSICOT* *; 5, *AMBRE*.

1, 2, rayant le verre; 2, avec réact. 23; 3, coupée au couteau; 4, réact. du plomb; 5, léger, combustible.

Minéraux rouges.

1, *CORNALINE*; 2, *JASPE ROUGE*; 3, *JASPE-OPALE DE FEU* *; 4, *PIEMONTITE* *; 5, *HÉMATITE ROUGE, SANGUINE*; 6, *ZINCITE*; 7, *MINIUM* *.

1, 2, 3, durs; 1, transparente; 2, opaque; 3, translucide, éclat gras, réact. 23; 4, prismes groupés, d'un rouge-foncé; 5, réact. du fer, poussière rouge; 6, lamelles rouge-sang, poussière orangée, réact. du zinc; 7, enduits, réact. du plomb.

Minéraux roses.

1, Opale; 2, Zoïsite (*THULITE*) *; 3, *QUINCYTE* *; 4, *PHARMACOLITE* (colorée par arséniate de cobalt) *; 5, *RHODONITE*; 6, *FRIEDELITE* *; 7, *ERYTHRINE*.

1, Raye le verre, réact. 23, accompagne la Quincyte; 2, masses roses fusibles, inattaquables; 3, particules rouge-carmin, avec opale rose, dans un calcaire, réact. de la magnésie; 4, fibres ou masses tendres, react. de l'arsenic et de la chaux; 5, masses dures, parcourues par filets noirs de pyrolusite, réact. du manganèse; 6, diffère de 5 par éclat gras et réact. 23; 7, aiguilles radiées fleur-de-pêcher, réact. de l'arsenic et du cobalt.

Minéraux noirs ou noirâtres.

1, *Silex pyromaque*; **2**, *LYDITE*; **3**, Résinite (var.); **4**, *OBSIDIENNE*; **5**, *Hypersthène* *; **6**, *Arsenic*; **7**, *PECHURANE* *; **8**, *WAD*; **9**, *ASBOLANE* *; **10**, *DIAMANT NOIR (CARBONADO)* *; **11**, *ANTHRACITE*; **12**, *HOUILLE*; **13**, *JAYET*.

1, Cassure esquilleuse, fait feu au briquet; **2**, grande finesse de grain, recevant la trace de l'or; **3**, distingué de **1** par éclat gras et réact. 23; **4**, vitreuse, cassure conchoïdale, rayée par **1**; **5**, lames planes noirâtres, à reflets semi-métalliques bruns et verts; **6**, masses concrétionnées très lourdes, volatiles; **7**, noir de poix, infusible, très lourd; **8**, brun-foncé, tachant les doigts, réact. du manganèse; **9**, noir de suie, réact. du cobalt; **10**, grains noirs brillants, d'une extrême dureté; **11**, **12**, **13**, combustibles; **11**, à cassure conchoïdale; **12**, à flamme épaisse, stratifiée; **13**, prend le poli.

Masses minérales d'un blanc mat.

1, *Cacholong. Opale commune*; **2**, *KAOLIN*; **3**, *MAGNESITE*; **4**, *PANDERMITE* *; **5**, *Marbre*; **6**, *Dolomie grenue*; **7**, *Giobertite* *; **8**, Barytine; **9**, Anhydrite; **10**, *Albâtre*; **11**, Phosphorite; **12**, Scheelite *; **13**, *Cryolite*; **14**, *Zinconise* *.

1, Raye le verre, éclat gras, réact. 23; **2**, infusible, plastique; **3**, sectile, très légère; **4**, cassure homogène d'un blanc éclatant, réact. du bore; **5**, effervescence facile; **6**, rude au toucher, effervescence moins facile; **7**, beaucoup plus lourde que **5** et **6**; **8**, très lourde, réact. du soufre et du baryum; **9**, réact. du soufre et du calcium; **10**, rayé à l'ongle, réact. 23; **11**, réact. du phosphore et du calcium; mamelonnée, à veines grises; **12**, densité extraordinaire pour un minéral blanchâtre (près de 6), éclat gras, fusible; attaquable par les acides; **13**, trois clivages presque rectangulaires, apparence de paraffine, fusible à la bougie; **14**, effervescence, réact. du zinc, souvent stalagmitique, réact. 23.

B. — MASSES MINÉRALES A ÉCLAT MÉTALLIQUE.

Minerais bronzés.

1, *PYRITE*; **2**, *PYRRHOTINE*; **3**, *NICKÉLINE*; **4**, *CHALCOPYRITE*; **5**, *ERUBESCITE*.

1, Jaune pâle, fait feu au briquet; **2**, bronze brun, magnétique, s'effeuillant à l'air; **3**, beau jaune rougeâtre de cuivre, réact. de l'arsenic et du nickel; **4**, bronze doré, réact. du cuivre et du fer; **5**, bronze brun, panaché de diverses couleurs, réact. du cuivre et du fer.

Minerais gris ou gris-noirs.

1, *MOLYBDÉNITE*; **2**, *PSILOMÉLANE*; **3**, *MAGNÉTITE*; **4**, *STANNINE* *; **5**, *CHALCOSINE*; **6**, *CUIVRES GRIS*; **7**, *GRAPHITE*.

1, Éclat gras, reflets bleus, poussière verte, en lamelles courbes dans le quartz; **2**, masses en formes d'arborisations, réact. du manganèse; **3**, noir de fer, grenue, magnétique; **4**, gris d'acier foncé, réact. du soufre et de l'étain, ordinairement mélangée de chalcopyrite; **5**, noire, sectile, réaction du cuivre; **6**, éclat gras, réact. du cuivre; **7**, noir de fer, grenu ou fibreux, tachant les doigts, infusible.

XI. — MINÉRAUX OFFRANT DES JEUX DE LUMIÈRE

1, *QUARTZ-ŒIL DE CHAT* *; **2**, *AVENTURINE*; **3**, *ŒIL DE TIGRE* *; **4**, *OPALE NOBLE*; **5**, *PIERRE DE LUNE* *; **6**, *Orthose opalisant (Anorthose* *; **7**, *PIERRE DE SOLEIL* *; **8**, *Labrador*; **9**, *BRONZITE*; **10**, *CROCIDOLITE* *; **11**, *Corindon à astérie*; **12**, *CYMOPHANE-ŒIL DE CHAT*; **13**, *LUMACHELLE*.

1, Caractères du quartz avec inclusions d'aiguilles d'asbeste; **2**, quartz avec paillettes

miroitantes de mica : **3**, reflets jaunes et bruns, veloutés, ordonnés en couches parallèles transversalement aux fibres de la substance, pseudomorphose de **10** : **4**, très beaux jeux de lumière, masses concrétionnées, réact. 13 : **5**, **6**, **7**, **8**, propriétés générales des feldspaths ; **5**, monoclinique, reflets opalins nacrés caractéristiques dans h^1 : **6**, reflets bleuâtres, inattaquable aux acides comme **5** : **7**, jeux de lumière d'un jaune-rougeâtre, dus à de petites paillettes d'oligiste : caractères de **5** et **6**, rayée par **2** : **8**, feldspath strié, magnifiques reflets chatoyants des plus belles couleurs, notamment de bleu et de vert : **9**, lamelles un peu courbes, à reflets bronzés : **10**, même structure que **3**, mais couleur bleu-velouté : **11**, jeux de lumière en étoile sur la base du prisme hexagonal, généralement bleu : **12**, verdâtre, reflets très chatoyants, réact. de l'alumine : **13**, calcaire coquillier, où de riches reflets avec nuances rouges sont produits par la nacre des coquilles.

XII. — PARTICULARITÉS DE STRUCTURE

Minéraux en paillettes.

1, *Tridymite* *; **2**, *MICAS* ; **3**, *CHLORITES* ; **4**, *CHLORITOÏDE* ; **5**, *OTTRÉLITE* ; **6**, *URANITE* ; **7**, *CHALCOLITE* ; **8**, *OLIGISTE ÉCAILLEUX* ; **9**, *CHALCOPHYLLITE* *; **10**, ***Buratite*** *; **11**, ***Graphite***.

1, Paillettes hexagonales minces et dures, maclées par trois : **2**, paillettes d'apparence hexagonale, flexibles et élastiques ; **3**, vert-foncé, flexibles mais non élastiques : **5**, vert-foncé : cassantes : **5**, vert-noirâtre, petites et disséminées dans la roche grise ; **6**, jaune-d'or, fusibles : **7**, vert-émeraude, fusibles, réact. du cuivre : **8**, violacées, brillantes, tachant les doigts en rougeâtre : **9**, vert-émeraude, réact. 23, solubles dans l'ammoniaque : **10**, paillettes (ou petites lamelles) vertes ou bleues, effervescentes ; **11**, noires, infusibles, combustibles.

Minéraux lamellaires et laminaires.

1° *A éclat non métallique.*

1, *Orthose* ; **2**, *Microcline* ; **3**, *Plagioclases* : **4**, *Eléolite* *; **5**, *Triphane* ; **6**, *Salite* *; **7**, *DIALLAGE* ; **8**, *BRONZITE* ; **9**, *Hypersthène* *; **10**, Grammatite *; **11**, *Disthène* ; **12**, Zoïsite *; **13**, *Talc* ; **14**, *Brucite* *; **15**, *AMBLYGONITE* *; **16**, *ORPIMENT* ; **17**, *ZINCITE* ; **18**, *BLENDE TRANSLUCIDE* ; **19**, ***Graphite***.

2 à **5**, rayant le verre : **1**, clivage à angle droit sur le plan des lamelles principales, couleur claire, souvent rose-chair : **2**, rose-chair : blanc ou vert (Amazonite), souvent moiré : **3**, lames ordinairement striées, de couleur bleue foncée, avec jeux de lumière pour le labrador : **4**, lamelles irrégulières, d'éclat gras, ordinairement grises ou gris-verdâtre, et accompagnées de Hornblende : **5**, masses laminaires blanc-verdâtre ou vert pomme, presque rectangulaires : **7**, lamelles habituellement courbes, verdâtres, à reflets : **8**, lamelles courbes, jaunâtres, reflets bronzés : **9**, lames planes, brun-noir, lourdes, reflets semi-métalliques : **10**, lamelles ou baguettes aplaties, gris-clair, tendance à l'asbeste : **11**, lames allongées, ondulées, bleu-de-ciel ; **12**, lames allongées gris-clair, qui gonflent et fondent au chalumeau, inattaquables : **13**, lames minces, très ondulées, vert-clair argenté, éclat et toucher gras : **14**, incolores ou verdâtre très clair, sectiles, éclat nacré ou cireux, infusibles : **15**, masses laminaires à faces planes, blanc-verdâtre ou rosé, fusibles, réact. du lithium : **16**, lamelles jaune d'or un peu orangé, volatiles : **17**, rouge-sang, éclat subadamantin, poussière orange ; **18**, jaune-miel, verdâtres ou jaune-orange à reflets rouges : nombreux clivages, réact. du soufre et du zinc : **19**, noir tachant les doigts.

2° *A éclat métallique.*

1, *Stibine* ; **2**, *Wolfram* ; **3**, *MOLYBDÉNITE* ; **4**, *OLIGISTE SPÉCULAIRE* ; **5**, ***Blende commune*** ; **6**, ***Nagyagite*** *.

1, Lamelles de clivage brillantes, gris de plomb, très fusibles ; **2**, lames noires, très

lourdes, dans le quartz; **3**, lames courbes, irrégulières, reflet bleuâtre, trait verdâtre; **4**, lames miroitantes très planes, poussière rouge; **5**, lames entre-croisées, brun-noir, réact. du soufre et du zinc; **6**, gris de plomb, brillantes, réact. de l'or et du tellure.

Minéraux en fibres, aiguilles et filaments.

1° *A éclat non métallique.*

1, Tourmaline; **2**, *Trémolite*; **3**, *ACTINOTE, ASBESTE, CROCIDOLITE*; **4**, *AMIANTE*; **5**, *GEDRITE* *; **6**, *Mésotype*; **7**, *FIBROLITE* *; **8**, *CHRYSOTILE*; **9**, *Aragonite*; **10**, Célestine; **11**, Gypse; **12**, *WAVELLITE*; **13**, *EXITÈLE* *; **14**, *KERMESITE* *; **15**, *ARSENIOSIDERITE*; **16**, *ERYTHRINE*; **17**, Cérusite. **18**, *CHALCOTRICHITE* *; **19**, *MALACHITE*; **20**, *Buratite.*

1. Fines aiguilles noires, dans le quartz; **2**, blanche, soyeuse; **3**, verte (Actinote) ou bleue (Crocidolite), rude au toucher comme **2**; **4**, en filaments blancs laineux; **5**, fibres grises, fusibles au chalumeau; **6**, fibres blanches, régulièrement rayonnées, très fusibles; **7**, fibres de tenacité extrême, réact. de silice et d'alumine pures; **8**, fibres jaune-d'or, non rayonnées, soyeuses, remplissant dans la serpentine des fentes aux parois desquelles elles sont perpendiculaires; **9**, fibres rayonnées, effervescentes, s'éparpillant au chalumeau; **10**, fibres bleu-clair, remplissage de fentes, lourdes, réact. de la strontiane; **11**, fibres soyeuses blanches ou bleuâtres, rayées à l'ongle; **12**, fibres vertes ou blanches chatoyantes, rayonnant toutes autour d'un centre, dans un même plan; **13**, fibres grises, volatiles; **14**, fibres rayonnées d'un rouge cochenille, volatiles; **15**, fibres jaune d'or, réact. du fer et de l'arsenic; **16**, fibres fleur de pêcher, réact. du cobalt; **17**, effervescence, grande densité, réact. du plomb; **18**, fibres d'un rouge extrêmement vif, réact. du cuivre; **19**, fibres vertes soyeuses, effervescentes, réact, du cuivre; **20**, fibres vert-pâle ou bleu-clair, effervescentes, réact. du cuivre et du zinc.

2° *A éclat métallique.*

1, *Rutile*; **2**, *Stibine*; **3**, *Pyrolusite*; **4**, Marcasite; **5**, Oligiste; **6**, Limonite; **7**, *Millérite* *; **8**, *Argent natif*; **9**, Or natif.

1, Filaments tantôt noirs, tantôt jaunes, dans le quartz, infusibles; **2**, filaments noir-bleuâtre, très fusibles; **3**, petites aiguilles gris d'acier, dures au toucher, dégageant de l'oxygène; **4**, fibres jaune-livide, groupées autour d'un point, formant boules rayonnées, altérables, à surface oxydée ou effleurie; **5**, fibres rougeâtres, à poussière rouge; **6**, fibres brunes, à poussière jaunâtre; **7**, aiguilles couleur de bronze, réact. du nickel; **8**, filaments capillaires, blanc d'argent; **9**, couleur caractéristique.

Minéraux bacillaires, en baguettes et prismes groupés.

1° *A éclat non métallique.*

1, Quartz; **2**, *Tourmaline*; **3**, Béryl; **4**, *Pycnite* *; **5**, *Trémolite*; **6**, *Idocrase*; **7**, *Epidote*; **8**, *Mésotype*; **9**, *Stilbite (Desmine)*; **10**. *Aragonite*; **11**, *Withérite* *; **12**, *Strontianite*; **13**, Calcite; **14**. Célestine; **15**, Gypse; **16**, *Pyromorphite.*

1, Prismes hexagonaux atrophiés, groupés en rosettes, passages à la calcédoine; **2**, colonnes noires ou roses, cannelées, fusibles; **3**, prismes hexagonaux groupés, peu colorés, très durs; **4**, prismes jaunâtres, avec mica, réact. du fluor; **5**, baguettes aplaties; **6**, colonnes brunes, radiées, fusibles; **7**, baguettes cannelées, vert-bouteille, vif éclat; **8**, prismes groupés, vitreux, presque quadratiques, très fusibles, réact. 23; **9**, plutôt baguettes lamellaires courbes, d'éclat nacré, groupées en gerbes, réact. 23; **10**, prismes en faisceaux, vif éclat vitreux, faisant effervescence et s'éparpillant au chalumeau; **13**, baguettes groupées, effervescentes, un peu laiteuses, de grande densité; **12**, baguettes groupées et enchevêtrées, incolores, denses, distinguées de **11** par la flamme; **11**, baguettes généralement irrégulières et blondes, effervescence facile, densité moindre que **10**; **14**, prismes groupés, blanc-laiteux, grande densité, associés à du

soufre, réact. du soufre et flamme du lithium; **15**, cristaux groupés, souvent jaunâtres, rayés à l'ongle; **16**, prismes hexagonaux groupés en stalactites, éclat adamantin, grande densité, fusibles, réact. du plomb.

2° *A éclat métallique.*

1, *Stibine*; **2**, *Acerdèse*.

1, Baguettes radiées, gris un peu bleuâtre, très fusibles; **2**, petits prismes cannelés noirs juxtaposés, réact. du manganèse et réact. 23.

Minéraux concrétionnés et mamelonnés.

1° *A éclat non métallique.*

1, *CALCÉDOINE, AGATE*; **2**, *RÉSINITE, CACHOLONG, GEYSÉRITE, OPALE NOBLE*; **3**, *NÉPHRITE*; **4**, *Prehnite*; **5**, *ALLOPHANE*; **6**, *ÉCUME DE MER*; **7**, *QUINCYTE**; **8**, *Calcite*; **9**, *Aragonite*; **10**, *TURQUOISE*; **11**, *Phosphorite*; **12**, *Limonite*; **13**, *Smithsonite*; **14**, *ZINCONISE**; **15**, *Calamine*; **16**, *ÉTAIN DE BOIS**; **17**, *Malachite*.

1, Silice; **2**, réact. 23, éclat gras; **3**, verte, dure, translucide, fusible; **4**, vert d'herbe, vif éclat vitreux; réact. 23; **5**, couleur bleue et verte, réact. du cuivre avec propriétés de l'argile; **6**, blanche, sectile, réact. 23; **7**, se distingue de **6** par sa couleur rose; **8**, couches stalagmitiques effervescentes; **9**, concrétions effervescentes, s'éparpillant au chalumeau; **10**, bleue, noircit au feu; **11**, couches concentriques irrégulières, de colorations diverses, souvent avec l'éclat de la porcelaine; **12**, masses mamelonnées et stalagmitiques à l'extérieur, fibreuses en dedans; **13**, croûtes stalagmatiques effervescentes, de colorations diverses, réact. du zinc; **14**, croûtes blanches mates, se distingant de **12** par réact. 23; **15**, croûtes stalagmitiques à réact. du zinc, non effervescentes; **16**, rognons à structure fibreuse, imitant les fibres du bois; **17**, rognons à couches concentriques vertes, effervescents.

2° *A éclat métallique.*

1, *Arsenic*; **2**, Antimoine; **3**, *PSILOMÉLANE*; **4**, Oligiste (Hématite rouge); **5**, *HÉMATITE BRUNE*.

1, Masses testacées bleu-noirâtre, très lourdes, volatiles; **2**, masses testacées blanc-gris, fusibles et volatiles avec dépôt blanc; **3**, concrétions gris-bleuâtre foncé, imitant parfois les feuilles de fougères; réact. du manganèse; **4**, masses mamelonnées et fibreuses rougeâtres, poussière rouge; **5**, masses mamelonnées, stalactitiformes, à surface arrondie et brillante, intérieur fibreux, poussière jaune.

XIII. — PROPRIETÉS PHYSIQUES DIVERSES

Minéraux de grande densité, à éclat non métallique.

1° *Incolores ou peu colorés.*

1, *GIOBERTITE** (3,1); **2**, *STRONTIANITE* (3,5); **3**, *CÉLESTINE* (4); **4**, *WITHÉRITE* (4,3); **5**, *SMITHSONITE* (4,4); **6**, *BARYTINE* (4,5); **7**, *SCHEELITE** (6); **8**, *ANGLÉSITE* (6,3); **9**, *CÉRUSITE* (6,5).

1, masses blanches amorphes, effervescentes; **2**, cristaux groupés incolores, effervescence, flamme du strontium; **3**, cristaux groupés en fibres, réact. du soufre et flamme du strontium; **4**, cristaux groupés un peu laiteux, effervescence, réact. du baryum; **5**, croûtes stalagmitiques, de colorations diverses, effervescence, réact. du zinc; **6**, réact. des sulfates, flamme du baryum; **7**, se distinguera de **8** et de **9** par l'absence de réaction au carbonate de soude et par le manque d'effervescence, ainsi que par la fusibilité; **8**, réact. du soufre et du plomb, cristaux limpides; **9**, effervescence, éclat adamantin et réact. du plomb.

2° *Colorés.*

1, *GRENATS* (3,8 à 4,2); **2**, *CORINDON* (4); **3**, *BLENDE* (var.) (4); **4**, *CASSITÉRITE* (7); **5**, *PECHURANE** (6,5 à 9).

1, Brun-rouges et noirs, fusibles; **2**, symétrie hexagonale, trois clivages rhomboédriques, extrême dureté; **3**, clivages dodécaédriques, donnant des lames jaune-miel, jaune-rouge ou vertes, d'éclat presque adamantin, anneaux colorés fréquents, réact. du zinc; **4**, pas de clivages distincts, brun-rouge ou brun foncé, parfois noir, éclat adamantin, sans altération au feu du chalumeau; **5**, noir de poix, infusible, réact. de l'uranium.

Minéraux sectiles.

1° *A éclat non métallique.*

1, *MICA*; **2**, *HALLOYSITE, LITHOMARGE*; **3**, *STEATITE* et *TALC*; **4**, *MAGNESITE*; **5**, *SERPENTINE*; **6**, *BRUCITE*; **7**, *ALBATRE*; **8**, *ORPIMENT*; **9**, *CÉRARGYRITE*; **10**, *OZOGÉRITE*; **11**, *AMBRE.*

1, Paillettes caractéristiques; **2**, simples silicates hydratés d'alumine; **3**, **4**, **5**, donnent la réaction de la magnésie; **3**, éclat et toucher gras; **4**, blanc mat; **5**, généralement verte et moins tendre; **6**, lamelles incolores, éclat nacré, infusibles, réact. de la magnésie; **7**, réaction des sulfates, teinte jaunâtre; **8**, lamelles jaune d'or, volatiles; **9**, masses gris-violacé, solubles dans l'ammoniaque; **10**, couleur claire, fusible, combustible; **11**, jaune résineux, combustible.

2° *A éclat métallique.*

1, *STIBINE*; **2**, *MOLYBDÉNITE*; **3**, *BISMUTH*; **4**, *CHALCOSINE*; **5**, *ARGYRITE*; **6**, *STEPHANITE**; **7**, *GRAPHITE.*

1, Bleu-noirâtre, très fusible; **2**, gris-bleu, éclat gras, trait verdâtre; **3**, jaune de laiton, fusible; **4**, noire, réact. du cuivre; **5**, noire, réact. de l'argent et du soufre; **6**, noir bleuâtre; réact. de l'argent, du soufre et de l'antimoine; **7**, tachant les doigts et le papier.

Minéraux tachant les doigts.

1, *MOLYBDENITE*; **2**, *WAD*; **3**, *HEMATITE ROUGE*; **4**, *OCRES*; **5**, *LIMONITE TERREUSE*; **6**, *ASBOLANE*; **7**, *GRAPHITE.*

1. Éclat gras, teinte bleu-violacé, trait bleu-verdâtre sur le biscuit; **2**, terne, noir-brun; **3**, poussière et trait rouges; **4** et **5**, poussière et trait brun-jaune; **6**, trait noir, réact. du cobalt; **2**, trait noir, infusible.

XIV. — MINÉRAUX A ÉCLAT MÉTALLIQUE, DISTINGUÉS PAR LA COULEUR DE LEUR POUSSIÈRE (1)

Poussière noire.

1, *PYROLUSITE*; **2**, *MAGNÉTITE*; **3**, *PANABASE*; **4**, *ARGYRITE*; **5**, *GRAPHITE.*

1, Réact. du manganèse; **2**, magnétique; **3**, réact. du cuivre; **4**, réact. de l'argent; **5**, infusible.

Poussière gris-noir.

1, *PYRRHOTINE*; **2**, *PYRITE*; **3**, *MISPICKEL*; **4**, *SMALTINE**; **5**, *COBALTINE*; **6**, *GALÈNE*; **7**, *ERUBESCITE.*

1, Magnétique; **2**, jaune, fait feu au briquet; **3**, blanc d'argent, réact. du sulfure d'arsenic;

(1) Nous rappellerons que la poussière d'un minéral est définie par le trait que laisse le minéral quand on le frotte contre une plaque de biscuit de porcelaine.

4, réact. du cobalt et de l'arsenic; **5**, réact. du cobalt et du sulfure d'arsenic; **6**, grande densité, réact. du plomb; **7**, teinte bronzée, panachée, réact. du cuivre.

Poussière gris-verdâtre.

1, *MOLYBDÉNITE*; **2**, *MARCASITE*.

1. Donne un trait gris sur le papier; **2**, métallique, bronzée.

Poussière noir-verdâtre.

1, *PYRITE*; **2**, *CHALCOPYRITE*.

Se distinguent par la présence ou l'absence du cuivre, ainsi que par la différence des teintes jaunes.

Poussière gris-bleuâtre.

1, *ARGYRITE*.

Sectile, réact. de l'argent.

Poussière noir-brunâtre.

1, *WOLFRAM*; **2**, *BRAUNITE*.

1, Très clivable, très lourd; **2**, réact. du manganèse; dégagement d'oxygène.

Poussière brune.

1, *HAUSMANNITE* *; **2**, *ACERDÈSE*.

1. Rouge brun; **2**, simplement brun; tous deux réact. du manganèse; **2**, donne en outre réact. 23.

Poussière brun-rouge foncé.

1, *HAUSMANNITE* *; **2**, *FRANKLINITE*.

1, Fort rare en cristaux; **2**, généralement en assez beaux octaèdres, réact. du zinc.

Poussière gris-rouge.

TENNANTITE *.

Réact. du cuivre, de l'arsenic et du soufre.

Poussière brun-jaune.

1, *RUTILE*; **2**, *LIMONITE*; **3**, *BLENDE*.

1, Infusible; **2**, réact. 23; **3**, réact. du soufre et du zinc; clivages nombreux.

Poussière rouge-orangé.

ZINCITE.

Minéral en lamelles rouge-sang, très clivables.

Poussière rouge.

1, *OLIGISTE*; **2**, *MARTITE* *; **3**, *CUPRITE*; **4**, *PYRARGYRITE*; **5**, *PROUSTITE*.

1. Lames noires ou cristaux à symétrie ternaire; **2**, octaèdres semblables à ceux de la magnétite, mais non magnétiques; **3**, petits octaèdres rouges ou cristaux de couleur d'un rouge-noirâtre très foncé; **4**, cristaux noir-bleuâtre à reflets rutilants; réact. de l'antimoine et de l'argent, poussière rouge cochenille; **5**, même poussière, réact. du soufre, de l'arsenic et de l'argent.

LEXIQUE

DES NOMS D'ESPÈCES ET DE VARIÉTÉS

EMPLOYÉS EN MINÉRALOGIE

AVERTISSEMENT

Les noms des minéraux cités dans le cours de cet ouvrage sont mis en évidence, dans le Lexique, par un caractère spécial, avec renvoi aux pages correspondantes de la description des espèces. A la suite de chaque nom imprimé en caractères romains, et relatif à une espèce ou variété non mentionnée dans ce Cours, on a placé, en italiques, soit la formule chimique du minéral, soit une indication sommaire de sa nature ou la mention de l'espèce à laquelle il doit être rattaché.

On a fait usage des abréviations suivantes : *var.* pour *variété*; *alt.* pour *produit d'altération*; *mél.* pour *mélange*; *comb.* pour *combinaison*; *esp.* pour *espèce*; *syn.* pour *synonyme*; *v.* pour *voir*. Outre les synonymes français, on a compris dans le Lexique, en raison de l'importance de la littérature minéralogique d'Allemagne, tous ceux des noms spécifiques allemands qui diffèrent des noms français autrement que par de simples détails d'orthographe.

La plupart des noms terminés en *ine* dans la nomenclature française ont été changés par J. D. Dana de manière à se terminer en *ite* ; ainsi *Adamite* au lieu d'*Adamine*, etc. Nous n'avons pas jugé qu'il fût toujours nécessaire de mentionner dans la synonymie des différences d'aussi faible importance (1).

A

Aarite. *v. Arite.*
Abichite, *syn. d'Aphanèse.*
Abrazite, *var. de Gismondine.*
Abriachanite, *silicate hydraté de Fe, Mg, voisin de Crocidolite.*
Acadialite, Acadiolite, *var. de Chabasie.*
Acanthikon, 541.
Acanthite, 661.
Acanthoïde, *var. de Diopside ou de Breislakite.*
Acerdèse, 603.
Achirite, Aschirite, *syn. de Dioptase.*
Achmatite, 541.
Achmite, *v. Acmite.*
Achrématite, *arsénio-molybdate de Pb, Cl.*
Achroïte, 484.
Achtaragdite, 535.
Achtarandite, Achtaryndite, *v. Achtaragdite.*
Aciculite, 643.
Acide arsénieux, *syn. d'Arsénolite.*
Acide borique, *syn. de Sassoline.*
Acide molybdique, *syn. de Molybdine.*

1. Dans les noms d'origine allemande, le K, lorsqu'il ne dérivait pas d'un nom propre, a été le plus souvent remplacé par un C. Dans les noms russes, les V, W et FF ont été considérés comme équivalents.

Acide tungstique, *syn. de Wolframine.*
Acide vanadique, *syn. de Vanadine.*

Acmite, 497.
Actinolite, Actynolite, *syn. d'Actinote.*

Actinote, 502.

Adamine, 628.
Adamsite, *var. de Muscovite.*
Adelite, *arséniate de Ca, Mg.*
Adelpholite, *var. de Columbite.*
Adinole, *var. d'Albite.*
Adipite, *syn. de Chabasie.*
Adipocérite, Adipocire, *syn. de Hatchettine.*

Adulaire, 455.
Aedelforsite, *v. Edelforsite.*
Aedelite, *v. Edelite.*

Aegirine, Aegyrine, 497.

Aenigmatite, 505.
Aérinite, *silicate bleu hydr. de Fe, Al, Ca, etc., du groupe des Chlorites.*
Aerosite, *syn. de Pyrargyrite.*
Aerugite, *arséniate anhydre de Ni.*

Aeschynite, 588.
Afrodite, *v. Aphrodite.*
Aftalose, *v. Aphthalose.*
Aftonite, *v. Aphthonite.*
Agalite, *alt. talqueuse d'Enstatite.*

Agalmatolite, 528.
Agaphite, Agapite, *syn de Turquoise.*

Agate, 448.
Aglaïte, *var. de Cymatolite.*
Agnésite, *minéral stéatiteux, faussement assimilé à la Bismuthite.*
Agnolite, *zéolite voisine d'Apophyllite.*
Agricolite, *var. d'Eulytine.*
Aguilarite, *sulfoséléniure d'argent.*
Agustite, *syn. d'Apatite.*

Aigue-marine, 487.

Aigue-marine orientale, 486.

Aikinite, 643.
Aimafibrite, *v. Hémafibrite.*

Aimant, 613.
Ainalite, *var. tantalifère de Cassitérite.*
Ainigmatite, *v. Aenigmatite.*
Aithalite, *syn. d'Asbolane.*
Ajkite, *var. d'Ambre.*
Akanthikon, *v. Acanthikon.*
Akérite, *var. bleue de Spinelle.*
Akermanite, *silicate de Ca, Mg, Mn, Al, artificiel.*
Akmite, *v. Acmite.*
Akontite, *var. de Danaïte.*

Alabandine, 601.
Alabastrite, *syn. d'Albâtre gypseux.*

Alalite, 495.
Alaskaite, *sulfure de Bi, Pb, Ag, Cu.*

Albâtre calcaire, 569.

Albâtre gypseux, 578.

Albertite, *var. d'Asphalte.*
Albine, *var. d'Apophyllite.*

Albite, 460.

Alexandrite, 559.
Alexandrolite, *silicate hydr. d'Al. Cr., alt. d'Avalite.*
Alexjejewite, *cire fossile.*
Algérite, *alt. de Wernérite.*

Algodonite, 648.
Alipite, *hydrosilicate de Ni et Mg.*

Alisonite, 646.
Alizite, *v. Alipite.*
Allactite, *arséniate hydr. de Mn.*

Allagite, 506.

Allanite, 492.

Allemontite, 596.

Allochroïte, 533.
Alloclase, *Glaucodote bismuthifère.*
Allogonite, *syn. de Herdérite.*
Allomorphite, *var. de Barytine.*

Allopalladium, 670.

Allophane, 527.
Allophite, *silicate hydr. de Mg, Al.*

Alluaudite, 606.
Almagrérite, *syn. de Zincosite.*

Almandine, 532.
Almandine, *var. violette de Spinelle.*

Alquifoux, 633.
Alshedite, *var. de Sphène.*

Alstonite, 565.

Altaïte, 633.

Alumiane, 577.
Alumine magnésiée, *syn. de Spinelle.*
Aluminilite, *syn. d'Alunite.*
Aluminite, *syn. de Webstérite.*
Alumocalcite, *var. d'Opale.*

Alun, 580.

Alun d'ammoniaque, 580.

Alun de fer, 580.

Alun de magnésie, 580.

Alun de manganèse, 580.
Alun de potasse, *syn. d'Alun.*

Alun de soude, 580.

Alunite, 579.

Alunogène, 579.
Alurgite, *mica manganésifère.*
Alvite, *var. de Zircon.*

Amalgame, 661.
Amarantite, *sulfate ferrique hydraté.*
Amausite, *var. compacte d'Oligoclase.*

Amazonite, 457.

Amblygonite, 585.
Amblystégite, *var. d'Hypersthène.*

Aréquipite, *Silico-antimoniate de Pb.*

Arfvedsonite, 504.

Argent, 660.

Argent antimonial, 662.

Argent corné, 666.

Argent noir, 663.

Argent rouge, 663, 664.

Argent sulfuré, 661.
Argent sulfuré flexible, *var. de Sternbergite.*

Argentite, 661.
Argentobismutite, *syn. de Matildite.*

Argentopyrite, 662.

Argile, 526.

Argile plastique, 527.

Argile réfractaire, 527.

Argile smectique, 529.

Argyrite, 661.
Argyrocératite, *syn. de Cérargyrite.*
Argyrodite, *sulfogermanate d'Ag.*
Argyropyrite, *var. de Sternbergite ou d'Argentopyrite.*
Argyropyrrhotine, *syn. de Sternbergite.*

Argyrose, 661.

Argyrythrose, 664.
Aricite, *var. de Gismondine.*
Arite, *Nickel arsénio-antimonial.*

Arkansite, 556.
Arksutite, *syn. de Chiolite.*
Arktizite, *v. Arcticite.*
Arménite, *syn. de Lazulite.*
Arnimite, *sulfate hydraté de Cu.*
Aromite, *sulfate hydr. de Mg, Al.*

Arquérite, 661.
Arrhénite, *silicotantalate hydraté d'Y, etc.*
Arsenargentite, *arséniure d'Ag, douteux.*
Arsenbismuth, *arséniure de Bi.*
Arseneisensinter, *syn. de Pitticite ou Sidérétine.*
Arsenglanz, *Arsenic avec 3 p. 100 de Bi.*

Arsenic, 595.
Arsenic sulfuré jaune, *syn. d'Orpiment.*
Arsenic sulfuré rouge, *syn. de Réalgar.*
Arsénicite, *var. de Pharmacolite.*
Arsenikbleispath, *syn. de Mimétèse.*
Arsenikblüthe, *syn. d'Arsénolite.*
Arsenikfahlerz, *syn. de Tennantite.*
Arsenikkies, *syn. de Mispickel.*
Arsenikschwärze, *var. impure d'Arsenic.*
Arseniksilber, *mél. de Dyscrase et Mispickel.*
Arseniksilberblende, *syn. de Proustite.*
Arsenikspiessglanz, *syn. d'Allemontite.*
Arsenikwismuth, *syn. d'Eulytine.*
Arséniopléite, *arséniate hydr. de Mn, Mg, Ca, Pb, Fe.*

Arséniosidérite, 619.

Arsénite, 596.
Arsénocrocite, *syn. d'Arséniosidérite.*
Arsénolamprite, *As avec Bi.*

Arsénolite, 596.
Arsénomélane, *syn. de Sartorite.*
Arsénophyllite, *syn. d'Arsénolite.*

Arsénopyrite, 612.
Arsénosidérite, *syn. de Löllingite.*
Arsénotellurite, *arséniosulfure de tellure, douteux.*
Arsenphyllite, *v. Arsénophyllite.*
Arsenstibite, *arséniate hydr. de Sb.*
Arsenurane, *arséniure d'uranium.*
Artinite, *var. d'Hydrogiobertite.*
Arzrunite, *sulfate de Pb avec chlorure de Cu.*
Asbeferrite, *var. d'Hédenbergite.*

Asbeste, 502.

Asbolane, 604, 621.
Asbolite, *syn. d'Asbolane.*
Ascharite, *borate hydr. de Mg.*
Asche, *var. terreuse de Dolomie.*
Aschenzieher, *syn. de Tourmaline.*

Asmanite, 449.
Asparagolite, *syn. d'Apatite.*

Aspasiolite, 479.
Aspérolite, *var. de Chrysocolle.*

Asphalte, 677.
Aspidelite, *var. de Sphène.*
Aspidolite, *var. de Phlogopite.*
Astéroïte, *var. d'Hédenbergite.*
Astochite, *syn. de Richtérite.*
Astrakanite, *var. de Blœdite.*
Astrolite, *hydro-silicate d'Al, Fe, Na, K.*

Astrophyllite, 548.

Atacamite, Atakamite, 658.
Atélestite, *arséniate de Bi.*
Atéline, *alt. de Ténorite.*
Athériastite, *var. de Wernérite.*
Atlaserz, Atlasite, *var. chlorurée de Malachite.*
Atopite, *antimoniate de Ca, Na, Fe.*
Attacolite, *var. calcifère de Berlinite.*
Auerbachite, *var. siliceuse de Zircon.*
Auerlite, *mél. de Thorite et Xénotime.*
Augélite, *phosphate d'alumine.*

Augite, 496.
Auralite, *alt. de Cordiérite.*

Auramalgame, 668.

Aurichalcite, 653.
Auripigment, *syn. d'Orpiment.*
Aurotellurite, *syn. de Sylvanite.*
Automolite, *var. de Gahnite.*

Autunite, 583.
Avaite, *var. d'Iridium.*
Avalite, *silicate de Cr, Al, Fe, K, Ca, Mn (var. de Fuchsite).*
Avasite, *silicate hydr. de Fe; alt. de Limonite.*

Berzéline, *var. d'Haüyne. — S'emploie aussi comme syn. de Berzélianite.*
Berzélite, *syn. de Mendipite; également employé comme syn. de Pétalite.*
Beudantine, *var. de Néphéline.*

Beudantite, 630; *désigne aussi une var. de Néphéline.*

Beurre de montagne, 580.

Beurre des tourbières, 678.
Beustite, *var. d'Epidote.*

Beyrichite, 622.
Bhreckite, *chlorite avec Ca et Mg.*

Biebérite, 621.
Bieirosite, *syn. de Dernbachite.*
Bielzite, *résine fossile.*
Bigsbyite, *oxyde de Fe et Mn avec Ti.*
Biharite, *var. de Pagodite.*

Bildstein, 528.
Bindheimite, *syn. de Bleinière.*
Binnite, *arséniosulfure de Cu, identique avec Tennantite; désigne aussi l'arséniosulfure de Pb, ou Dufrénoysite.*
Biotine, *var. d'Anorthite.*

Biotite, 473, 474.
Biphosphammite, *var. de Guano.*
Bischofite, *chlorure hydr. de Mg.*
Bishopvillite, *syn. de Shepardite.*
Bisilicate de Franklin, *syn. de Troostite.*

Bismite, 643.

Bismuth, 642.
Bismuth Glance, *syn. de Bismuthine.*
Bismuth silicaté, *syn. d'Eulytine.*
Bismuth sulfuré, *syn. de Bismuthine.*
Bismuth sulfuré cuprifère, *syn. de Wittichenite.*
Bismuthaurite, *Or bismuthifère.*

Bismuthine, 643.
Bismuthinite, *syn. de Bismuthine.*

Bismuthite, 643.

Bismuthocre, 643.
Bismuthoferrite, *silicate de Bi et Fe.*
Bismutholamprite, *syn. de Bismuthine.*
Bismuthosphérite, *carbonate hydr. de Bi.*
Bismutite, *v. Bismuthite.*
Bismutosmaltine, $Co(As,Bi)^3$.
Bittersalz, *syn. d'Epsomite.*
Bitterspath, *syn. de Dolomie.*
Bitterstein, *syn. de Zoïsite.*

Bitume glutineux, 677.
Biluménite, *syn. de Torbanite.*

Bitumes, 677.
Bixbyite, *v. Bigsbyite.*
Bjelkite, *var. de Cosalite.*
Black Coal, *syn. de Houille.*
Blackmorite, *var. d'Opale.*
Blakéite, *var. de Coquimbite.*

Blättelerz, Blätteltellur, 669.
Blättererz, *v. Blättelerz.*

Blattérine, *syn. d'Élasmose.*
Blätterkies, *syn. de Marcasite.*
Blätterzeolith, *syn. de Heulandite.*
Blaubleierz, *pseudomorphose de Pyromorphite en Galène.*
Blaueisenerde, *syn. de Vivianite.*
Blaueisenstein, *syn. de Crocidolite.*
Blauspath, *syn. de Klaprothine.*
Bleiantimonglanz, *syn. de Zinckénite.*
Bleiantimonit, *syn. de Jamesonite.*
Bleiarsenglanz, *syn. de Sartorite.*
Bleiarsenit, *syn. de Dufrénoysite.*
Bleierde, *var. terreuse de Cérusite.*
Bleifahlerz, *syn. de Bournonite.*
Bleigelb, *syn. de Wulfénite.*
Bleiglanz, *syn. de Galène.*
Bleiglas, *syn. d'Anglésite.*
Bleiglatte, *syn. de Massicot.*
Bleigummi, *syn. de Plombgomme.*
Bleikerat, *syn. de Phosgénite.*
Bleilasur, *syn. de Linarite.*
Bleinière, $H^8 Pb^3 Sb^2 O^{12}$.
Bleischimmer, *syn. de Jamesonite.*

Bleischwärze, 635.

Bleischweif, 632.
Bleispath, *syn. de Cérusite.*
Bleivitriol, *syn. d'Anglésite.*

Blende, 624.
Bliabergite, *silicate hydr. de Al, Fe, Mn, ident. avec Ottrélite.*

Bloedite, 579.
Blomstrandite, *niobo-titanate hydr. d'urane.*
Blueite, *Pyrite nickelifère.*
Blumenbachite, *syn. d'Alabandine.*
Blumite, *var. ferrifère de Hübnérite; également employé comme syn. de Bleinière.*
Blutstein, *syn. d'Oligiste.*

Bobierrite, 582.
Bockseife, *syn. de Savon de montagne.*
Bodénite, *var. de Muromontite.*

Bog manganèse, 604.
Boghead, *var. de bitume schisteux.*
Bogoslovskite, *silicate impur de Cu.*
Bohl, *v. Bol.*
Bohnerz, *var. de Limonite.*

Bois bitumineux, 675.

Bol, 529.

Boléite, 609.
Bolivianite, *Stibine argentifère.*
Bolivite, *alt. de Bismuthine.*
Bolophérite, *syn. d'Hédenbergite.*
Bolorétine, *résine fossile.*
Bolovérite, *var. d'Anthophyllite.*
Boltonite, *var. alumineuse de Forstérite.*
Bombiccite, *résine fossile.*
Bombite, *var. de Mélanite.*
Bonsdorffite, *var. de Fahlunite.*
Boothite, *sulfate hydr. de Cu.*

Boracite, 561.

Cacoxène, 618.

Cadmium sulfuré, 626.
Cænite, Cenite, *v. Kaïnite.*
Cæruléolactite, *var. de Wavellite.*

Caillou du Rhin, 446.
Caïnite, *v. Kaïnite.*
Cajuelite, *syn. de Rutile.*
Calaïte, *v. Callaïte.*

Calamine, 627, 629.

Calamine terreuse, 627.
Calamite, *var. de Trémolite.*

Calavérite, 668.
Calcaire, *syn. de Calcite.*
Calcanalcime, *var. d'Analcime.*
Calcaréobaryte, *var. calcarifère de Barytine.*
Calccélestine, *var. calcarifère de Célestine.*

Calcédoine, 447.

Calcédonite, 447.
Calcimangite, *syn. de Spartaïte.*
Calcinitre, *syn. de Nitrocalcite.*
Calciocélestine, *v. Calccélestine.*
Calcioferrite, *c. Calcoferrite.*
Calciostrontianite, *var. de Strontianite.*
Calciothorite, *alt. d'un silicate de Th.*

Calciovolborthite, 657.

Calcite, 565.
Calcoferrite, *var. de Dufrénite.*
Calcomalachite, *mél. de Malachite, Calcite et Gypse.*
Calcouranite, *var. d'Uranite.*
Calcovanadite, *vanadate de Ca.*
Calcozincite, *mél. de Zincite et Calcite.*
Calcwavellite, *var. de Wavellite.*
Caldérite, *var. compacte de Grossulaire.*

Calédonite, 637.
Californite, *var. verte d'Idocrase.*

Callaïnite, Callaïte, 584.
Callochrome, *syn. de Crocoïse.*

Calomel, 660.
Calstronbaryte, *var. de Barytine avec Ca et Sr.*
Calvonigrite, *var. de Psilomélane.*
Calyptolite, *var. alt. de Zircon.*
Campbellite, *var. de Chalypite.*

Campylite, 638.
Canaanite, *var. compacte de Wernérite ou de Pyroxène.*

Cancrinite, 469.

Candite, 559.
Canfieldite, *var. stannifère d'Argyrodite.*
Cantalite, *var. de Pétrosilex.*

Cantonite, 646.

Caoutchouc minéral, 677.
Capillose, *syn. de Millérite.*

Capnite, 627.
Caporcianite, *var. de Laumontite.*

Cappelénite, *silicate hydraté de Gl, Y, Ba, etc.*
Caracolite, *oxychlorure de Pb avec sulfate de Na.*
Carbocérine, *var. de Lanthanite.*

Carbonado, 672.
Carbonite, *coke naturel.*
Carbonyttrine, *carbonate d'yttria.*
Carinthine, *var. de Hornblende.*
Carinthite, *syn. de Wulfénite.*
Carménite, *mél. de Chalcosine et Covelline.*
Carminite, Carminspath, *arséniate de Fe, Pb.*

Carnallite, 589.
Carnat, *Kaolin ferrugineux.*
Carnatite, *var. de Labrador*
Carnéliane, *syn. de Cornaline.*
Carnotite, *urano-vanadate hydr. complexe de potasse.*
Carolathine, *Allophane bitumineuse.*

Carpholite, 520.
Carphosidérite, *sulfate hydraté de Fe.*
Carphostilbite, *var. de Thomsonite.*
Carrollite, *Sulfure de Cu et Co.*

Carton de montagne, 502.
Caryinite, *v. Karyinite.*
Caryocérite, *esp. voisine de Mélanocérite.*
Caryopilite, *silicate hydr. de Mn.*
Cassinite, *feldspath barytique.*

Cassitérite, 631.
Cassitérotantalite, *var. de Tantalite.*
Castanite, *sulfate hydr. de Fe.*
Castellite, *var. de Sphène.*
Castelnaudite, *var. de Xénotime.*
Castillite, *sulfure de Cu, Zn, Pb, Fe, Ag; — également employé comme syn. de Guanajuatite.*

Castor, 472.
Castorite, *v. Castor.*
Caswellite. *esp. de Clintonite.*

Catapléite, 493.
Cataspilite, *var. de Cordiérite.*
Cathkinite, *syn. de Saponite.*
Catlinite, *var. d'Argile.*
Cavolinite, *var. de Néphéline.*
Cédarite, *résine fossile.*
Cegamite, *syn. d'Hydrozincite.*

Céladonite, 521.
Célestialite, *sulfo-hydrocarbure météorique.*

Célestine, 575.
Célestobaryte, *Barytine avec Célestine.*
Celsiane, *Anorthite barytique.*
Cénosite, *v. Kaïnosite.*
Centrallassite, *var. d'Okénite.*
Centrolite, *silicate de Pb et Mn.*

Cérargyre, Cérargyrite, 666.
Cérasine, *syn. de Phosgénite.*
Cérasite, *Cordiérite avec inclusions charbonneuses.*
Cerbolite, *syn. de Boussingaultite.*

Elpidite, *silicate de Zr et Na.*
Elroquite, *silico-phosphate hydr. de Fe, Al.*

Embolite, 666.
Embrithite, *var. de Boulangérite.*
Emerald-nickel, *syn. de Texasite.*

Émeraude, 487.

Émeraude orientale, 557.

Émeri, 557.

Emerylite, 548.
Emmonite, *var. calcarif. de Strontianite.*
Emmonsite, *tellurite de Fe.*
Empholite, *syn. de Diaspore.*

Emplectite, 643.

Enargite, 648.
Enceladite, *syn. de Warwickite.*
Endéiolite, *siliconiobate du groupe du Pyrochlore.*
Endellionite, *syn. de Bournonite.*
Endlichite, *var. vanadifère de Mimétèse.*
Engelhardite, *var. octaédrique de Zircon.*
Enhydre, Enhydros, *Calcédoine avec gouttes d'eau.*
Enophite, *var. de Chlorite.*

Enstatite, 499.
Enysite, *sulfate hydr. complexe d'Al, Cu.*
Eosite, *vanado-molybdate de Pb.*
Eosphorite, *phosphate hydr. d'Al, Mn, Fe, rhombique, voisin de Childrenite.*
Ephésite, *var. de Margarite.*
Epiboulangérite, *alt. de Boulangérite.*
Epichlorite, *var. de Ripidolite ou de Clinochlore.*
Epididymite, *Eudidymite rhombique.*

Epidote, 540.
Epigénite, *sulfo-arséniure de Fe, Cu; désigne aussi la Néotésite.*
Epiglaubite, *var. de Brushite.*
Epimillerite, *syn. de Morenosite.*
Epiphanite, *var. de Ripidolite.*
Epiphosphorite, *var. d'Apatite.*
Episphærite, *zéolite mal déterminée.*

Epistilbite, 516.
Epistolite, *silico-niobate complexe.*

Epsomite, 578.
Ercinite, *syn. d'Harmotome barytique.*
Erdkobalt, *syn. d'Asbolane.*

Erdkohle, 675.
Erdmannite, *var. ferreuse de Zircon; désigne aussi une var. d'Orthite.*
Erdol, *syn. de Naphte.*
Erdpech, *syn. de Bitume.*
Erdwachs, *syn. d'Ozocérite.*
Erémite, *syn. de Monazite.*
Erikite, *silico-phosphate hydr. complexe.*

Erinite, 656; *désigne aussi une variété de Bol.*
Eriochalcite, *var. d'Atacamite.*
Erionite, *zeolite à K, Na, Ca.*

Erlane, *var. compacte de Grossulaire.*
Ersbyite, *var. de Microcline.*

Erubescite, 647.
Erusibite, *var. de sulfate ferrique.*

Erythine, 621.
Erythrite, *var. magnésienne d'Orthose.*
Erythrocalcite, *chlorure cuivreux.*
Erythroconite, *syn. de Tennantite.*
Erythrosidérite, *chlorure de Fe, K; K^2, Fe, $Cl^5 + aq$.*
Erythrozincite, *sulfure de Zn, Mn.*

Escarboucle, 532.
Eschérite, *syn. d'Epidote.*
Eschwégite, *var. d'Actinote.*
Esmarkite, *syn. de Datolite.*

Esmarkite d'Erdmann, 479.
Esmarkite de Dufrénoy, *var. de Paranthine.*
Esmeraldaïte, *var. d'hydrate ferrique.*

Essonite, 531.

Etain, 630.

Etain de bois, 632.

Etain oxydé, 631.
Etain sulfuré, *syn. de Stannine.*
Ettringite, *sulfate hydr. de Ca, Al.*

Eucaïrite, Eukaïrite, 662.
Eucamptite, Eukamptite, *var. de Biotite.*
Euchlorine, *comb. de sulfate et de chlorure de Cu avec alcalis.*
Euchlorite, *var. de Biotite.*

Euchroïte, 656.
Euchysidérite, *var. d'Hedenbergite.*

Euclase, 489.

Eucolite, 491.
Eucrasite, *var. de Thorite.*
Eucryptite, *silicate hexagonal d'Al, Li.*

Eudialyte, Eudyalite, 491.
Eudidymite, *silicate hydr. de Gl, Na.*

Eudnophite, 511.
Eugénésite, *syn. d'Allopalladium.*
Eugenglanz, *syn. de Polybasite.*
Eukrasite, *v. Eucrasite.*
Eulysite, *Olivine ferrifère.*

Eulytine, 644.
Eumanite, *var. de Brookite.*

Euosmite, 677.
Euphyllite, *var. de Muscovite.*
Eupyrchroïte, *var. fibreuse de Phosphorite.*
Euralite, *var. de Delessite.*

Eusynchite, 640.
Eutalite, Euthalite, *var. d'Analcime.*

Euxénite, 588.
Euzéolite, *syn. de Heulandite.*
Evansite, *phosphate hydr. d'Al.*
Evigtokite, *fluorure hydr. d'Al et Ca, probabl. syn. de Gearksutite.*
Exanthalose, *var. de Mirabilite.*

Forbésite, *arséniate hydraté de Co et Ni, alt. de Chloanthite.*
Forchérite, **Forschérite**, *var. d'Opale.*
Forchhammerite, *silicate hydr. de Fe.*
Forésite, *zéolite voisine de Stilbite.*

Forstérite. 508.
Fouquéite, *Zoïsite monoclinique.*
Fournétite, *var. de Panabase ou mélange de Galène et de minerai cuivreux.*

Fowlérite. 606.
Franckéite, *sulfostannoantimoniure de Pb.*
Francolite. *var. de Dahllite.*
Franklandite, *var. d'Ulexite.*

Franklinite, 627.
Fraueneis, *syn. de Gypse.*
Frauenglas, *syn. de Mica.*
Fredricite. *var. de Tennantite.*

Freibergite, 651.

Freieslebénite, 634.
Frenzélite, *séléniure de Bi.*
Freyalite, *esp. voisine de Thorite.*

Friedélite, 606.

Frieséite. 662.
Frigidite, *var. de Panabase.*
Fritzschéite, *var. d'Uranite.*
Frugardite, *var. d'Idocrase à Mg.*

Fuchsite. 478.
Fuggérite, *var. de Gehlénite.*
Fullodite, *var. de Gœthite.*
Funkite, *syn. de Coccolite.*
Fuscite, *syn. de Wernérite.*

G

Gabbronite, **Gabronite**, *var. attribuée, soit à la Wernérite, soit à l'Eléolite.*
Gæbhardite, *syn. de Fuchsite.*

Gadolinite. 491.
Gagat, *syn. de Jayet.*

Gahnite, 560; *désigne aussi une var. d'Idocrase.*
Galactite, *var. de Mésotype.*
Galapectite, *var. d'Halloysite.*

Galène. 632.
Galénobismuthite, *sulfure de Bi et Pb.*
Galénocératite, *syn. de Phosgénite.*
Galitzinite, **Gallitzinite**, *syn. de Goslarite.*
Galmei, *syn. de Calamine.*
Gamsigradite, *Hornblende manganésifère.*
Ganomalite, *silicate de Pb, Mn, Ca.*
Ganomatite, *var. de Sidérétine, syn. de Chenocoprolite.*
Genophyllite, *silicate hydr. de Mn, Al.*
Gansekötbigerz, *syn. de Ganomatite.*
Gapite, *syn. de Morenosite.*
Garbyite, *syn. d'Enargite.*

Garniérite, 551, 624.
Garnsdorffite, *syn. de Pissophane.*
Gastaldite, *var. de Glaucophane.*
Gauthite, *var. d'Orthite.*

Gay-Lussite, 573.
Géarksutite, *fluorure hydr. d'Al, Na et Ca.*
Gédanite, *résine fossile.*

Gédrite. 505.

Gehlénite, 534.
Geiérite, *v. Geyérite.*
Geikielite, *titanate de Mg, Fe.*
Gelbantimonerz, *syn. de Cervantite.*
Gelbbleierz, *syn. de Wulfénite.*
Gelbeisenerz, *syn. de Jarosite*
Gelbeisenstein, *syn. de Xanthosidérite.*
Gelberde, *syn. de Limonite.*
Gelberz, *syn. de Sylvanite ou plutôt de Krennérite.*
Gelbes Rauschgelb, *syn. d'Orpiment.*

Genthite, 624.
Géocérellite, *résine fossile.*
Géocérite, *id.*
Géocronite, *sulfoantimoniure de Pb*, $Pb^5Sb^2S^8$.
Géomyricite, *résine fossile.*
Georgiadésite, *chloro-arséniate de Pb.*
Géoxène, *syn. de fer météorique nickelé.*
Gerhardtite, *azotate hydr. de Cu.*
Germarite, *var. d'Hypersthène.*
Gersbyite, *espèce voisine de Lazulite.*

Gersdorffite, 622.
Geyérite, *var. sulfurée de Leucopyrite.*

Geysérite, 451.
Gibbsite, *var. d'Hydrargilite; désigne aussi un phosphate hydr. d'Al.*

Gieseckite. 469.

Gigantolite, 479.

Gilbertite. 478.
Gillebäckite, *var. de Wollastonite.*
Gillingite, *var. d'Hisingérite.*
Gilsonite, *var. d'Uintahite.*
Ginilsite, *silicate hyd. d'Al, Fe, Mg. Ca.*

Giobertite, 571.
Giorgiosite, *hydrocarbonate de Mg.*

Girasol, 446, 450.

Gismondine, 513.
Giufite, **Giuffite**, *syn. de Milarite.*
Gjellebékite, *v. Gillebäckite.*

Glace, 553.
Glagérite, *var. d'Halloysite.*

Glaise (terre), 527.
Glancespar, *var. d'Andalousite.*
Glanzarsenikkies, *syn. de Leucopyrite.*
Glanzbraunstein, *syn. d'Hausmannite.*
Glanzerz, *v. Glaserz.*
Glanzkobalt, *syn. de Kobaltglanz.*
Glasbachite, *séléniure de Pb.*

Glasérite, 573.

Haddamite, *var. de Microlite.*
Hæma... *v. Héma.*
Hafnefjordite, *var. de Labrador.*
Hagemannite, *var. de Thomsenolite.*
Haidingérite, *arseniate rhombique de Ca. également employé comme syn. de Berthiérite.*
Hainite, *silicate de Ca, Na, Ti, Zr.*
Halbvitriolblei, *syn. de Lanarkite.*

Halite, 589.
Hallite, *syn. de Webstérite; désigne aussi une var. altérée de Phlogopite.*

Halloysite, 526.
Halochalcite, *syn. d'Atacamite.*

Halotrichite, 580; *également employé comme syn. d'Alunogène.*
Häma.... *v. Héma...*
Hamartite, *syn. de Bastnaésite.*
Hambergite, *borate hydr. de Gl.*
Hamelite, *silicate douteux d'Al, Fe, Mg.*
Hamlinite, *fluo-phosphate hydr. d'Al et de Sr.*
Hampshirite, *var. de Talc.*
Hancockite, *sorte d'Épidote à Pb et Sr.*
Hanksite, *sulfocarbonate de Na.*
Hannayite, *phosphate hydr. de Mg et Am.*
Haplotypite, *syn. d'Ilménite.*
Hardystonite, *silicate de Ca, Mg, Mn, Zn.*
Harkise, *syn. de Millerite.*
Harmophane, *var. de Corindon.*

Harmotome (barytique), 519.

Harmotome (calcaire), 513.
Harringtonite, *matière gommeuse, tenant en suspension Mésotype et Scolésite.*
Harrisite, *Chalcosine pseudom. de Galène.*
Harstigite, *silicate hydr. de Ca, Mn.*
Hartbraunstein, *syn. de Braunite.*

Hartine, 678.

Hartite, 676.
Hartitte, *phosphosulfate hydr. d'Al, Ca, Sr.*
Hartkolbalterz, *syn. de Skutterudite.*
Hartmanganerz, *syn. de Psilomélane.*
Hartmannite, *syn. de Breithauptite.*
Hartspath, *var. d'Andalousite.*
Harttantalerz, *var. de Tantalite.*
Hastingsite, *var. sodifère d'Amphibole.*

Hatchettine, 676.
Hatchettolite, *Pyrochlore uranifère.*
Hauchecornite, *sulfure quadratique de Ni, Bi.*

Hauérite, 601.
Haughtonite, *var. de Biotite.*

Hausmannite, 602.
Hautefeuillite, *phosphate hydr. de Ca, Mg.*

Haüyne, 469.
Haydénite, *var. de Chabasie.*

Hayésine, 561.
Haytorite, *Calcédoine pseudom. de Datolite.*
Heazlewoodite, *sulfure voisin de Pentlandite.*
Hebétine, *syn. de Willemite.*

Hébronite, 585.
Hécatolite, *syn. de Pierre de lune.*
Hectorite, *minéral pyroxénique.*

Hédenbergite, 495.

Hédyphane, 638.
Heintzite, *borate hydr. de Mg, K.*
Heldburgite, *Guarinite sans Ti.*
Hélénite, *var. de caoutchouc minéral.*
Héliolite, *feldspath aventuriné.*
Héliophyllite, *var. d'Ecdémite.*

Héliotrope, 448.
Hellandite, *silicate de Ca, Di, La, Al, Fe, Mn.*

Helminthe, 545.
Helvétan, *var. de Biotite.*

Helvine, Helvite, 535.
Hémafibrite, *arséniate hydr. de Mn.*

Hématite, 614.

Hématite brune, 616.

Hématite rouge, 614.

Hematoconite, 569.
Hématolite, *arséniate hydr. de Mn.*
Hématostibiite, *antimoniate de Mn, Fe.*
Hémichalcite, *syn. d'Emplectite.*
Hémimorphite, *syn. de Calamine.*
Henkelite, *syn. d'Argyrite.*
Henryite, *mél. d'Altaïte et Pyrite.*
Henwoodite, *phosphate hydr. d'Al, Cu.*
Hepatinerz, *mél. de Limonite, Cuprite et Atacamite.*
Hépatite, *syn. de Barytine.*

Hépatopyrite, 611.

Hercynite, 560.
Herdérite, *fluophosphate de Ca et Gl.*
Hermannite, *Amphibole exclusivement manganésifère.*
Hermannolite, *var. de Baierine.*
Hermésite, *var. mercurifère de Panabase.*
Herrengrundite, *sulfate hydr. de Cu, Ca.*
Herrérite, *Smithsonite cuprifère.*
Herschélite, *zéolite voisine de Chabasie.*
Hertérine, Hertérite, *arsénio-antimoniate de Cu, Ag, Fe, etc.*
Hessenbergite, *silicate indéterminé, ressemblant à l'Euclase.*

Hessite, 662.
Hessonite, *v. Essonite.*
Hétærolite, Hétairite, *Hausmannite zincifère.*
Hétépozite, *v. Hétérosite.*

Hétérocline, 602.

Hétérogénite, 621.
Hétérolite, *v. Hétærolite.*
Hétéromérite, *var. d'Idocrase.*

Hétéromorphite, 634.

Hétérosite, 606.
Heubachite, *oxyde hydr. de Co, Ni, Fe, Mn.*

Heulandite, 515.

Hydronoséane, *Noséane artificielle.*

Hydrophane, 451.
Hydrophilite, *chlorure de Ca.*
Hydrophite, *var. de Serpentine.*
Hydrophyllite, *v. Hydrophilite.*
Hydropite, *alt. de Rhodonite.*
Hydroplumbite, *oxyde hydr. de Pb, douteux.*
Hydropyrite, *syn. de Marcasite.*
Hydrorhodonite, *Rhodonite altérée et lithinifère.*
Hydrorutile, *Rutile hydraté.*
Hydrosamarskite, *Samarskite hydratée.*
Hydrosidérite, *syn. de Limonite.*
Hydrosilicite, *silicate hydr. de Ca, Mg; employé aussi pour Cérolite.*
Hydrostéatite, *var. de Talc.*
Hydrotachylyte, *var. vitreuse de Labrador.*
Hydrotalc, *syn. de Pennine.*
Hydrotalcite, *oxyde hydr d'Al et Mg.*
Hydrotéphroïte, *alt. de Téphroïte.*
Hydrotitanite, *alt. de Dysanalyte.*

Hydrozincite, 627.
Hygrophilite, *silicate hydr. d'Al avec alcalis, voisin de Pinite.*
Hypargyrite, *syn. de Miargyrite.*

Hypersthène, 499.
Hypochlorite, *var. de Bismuthoferrite.*
Hypodesmine, *var. de Desmine.*
Hypoléimme, *syn. de Lunnite.*
Hyposclérite, *var. verte d'Albite.*
Hypostilbite, *var. de Stilbite; désigne aussi une var. de Laumontite.*
Hypotyphite, *Arsenic bismuthifère.*
Hypoxanthite, *Ocre dite Terre de Sienne.*
Hystatite, *var d'Ilménite.*

I

Ibérite, *var. de Pinite.*
Ichtyophthalme, *syn. d'Apophyllite.*
Iddingsite, *minéral rhombique voisin de Bowlingite.*

Idocrase, 534.
Idrialine, *v. Idrialite.*
Idrialite, Idriatine, 676.
Idrizite, *sulfate du groupe de Botryogène.*
Igelströmite, *var. de Knebélite; aussi employé comme syn. de Pyroaurite.*
Iglésiasite, *Cerusite zincifère.*
Iglite, Igloïte, *var. d'Aragonite.*
Ignatiewite, *silicate impur et hydr. d'Al, K.*
Ibléite, *sulfate hydr. de Fe.*
Iiwaarite, *v. Ivaarite.*
Ildefonsite, *syn. de Tantalite.*
Ilésite, *sulfate hydr. de Mn, Fe, Zn.*
Illuderite, *syn. de Zoïsite.*

Ilménite, 615.
Ilménorutile, *Rutile ferreux.*

Ilsemannite, 598.

Ilvaïte, 542.
Indianaïte, *var. d'Halloysite.*
Indianite, *var. d'Anorthite.*

Indicolite, Indigolite, 484.
Inésite, *silicate hydr. de Mn, Ca.*
Inolite, *tuf calcaire.*
Inverarite, *sorte de Pyrrhotine nickelifère.*
Iochroïte, *silicate vanadifère.*

Iodargyre, Iodargyrite, 666.

Iodembolite, 666.
Iodite, *syn. d'Iodargyrite.*

Iodobromite, 666.
Iodsilber, *syn. d'Iodargyrite.*
Iodyrite, *syn. d'Iodargyrite.*

Iolite, 479.
Ionite, *hydrocarbure naturel mal défini.*

Iridium, 670.

Iridosmine, 670.
Iridosmium, *syn. de Sysserskite.*
Irite, *mél. de Chromite et d'Iridosmine.*
Isabellite, *var. de Richtérite.*
Isérine, Isérite, *var. d'Ilménite.*
Isoclase, Isoclasite, *phosphate hydr. de Ca.*
Isophane, *var. de Franklinite.*
Isopyre, *var. impure d'Opale.*
Ittnérite, *alt. d'Haüyne.*
Ivaarite, Iwaarite, *grenat titanifère, voisin de Schorlomite.*
Ivigtite, *silicate hydr. d'Al, Fe, Ca, voisin de Gilbertite.*
Ixiolite, Ixionolite, *var. manganésifère de Tantalite.*
Ixolyte, *cire fossile.*

Jacksonite, *var. de Prehnite; désigne aussi une var. de Chrysocolle.*
Jacobsite, *spinelle de Fe, Mn, Mg.*

Jade, 498, 502.

Jade de Saussure, 464.

Jadéite, 498.
Jaipurite, *sulfure de Co (problématique).*

Jais, 675.

Jalpaïte, 645, 662.

Jamesonite, 634; *employé aussi comme syn. de Chiastolite.*
Jargon, *syn. de Zircon.*
Jarosite, *sulfate hydr. de Fe, Na, K.*
Jarrowite, *syn. de Thinolite.*

Jaspe, 447, 449.

Jaspe opale, 451.

Jaspe sanguin, 448.
Jaulingite, *résine fossile.*

Jayet, 675.

K (1)

(1) Ceux des noms, d'origine allemande, qu'on ne trouvera pas à la lettre K, devront être cherchés sous la rubrique C.

Klementite, *silicate hydr. de Mg, Al, Fe.*
Klipsteinite, *alt. de Rhodonite.*
Knauffite, *syn. de Volborthite.*

Knébélite, 508.
Knopite, *var. de Perowskite.*
Knoxvillite, *sulfate de Cr, Fe, Al.*
Kobaltbeschlag, *Erythrine avec acide arsénique.*
Kobaltblüthe, *syn. d'Erythrine.*

Kobaltglanz, 620.
Kobaltkies, *syn. de Linneite.*
Kobaltvitriol, *syn. de Biebérite.*
Kobellite, *sulfoantimoniure de Pb et Bi.*
Koboldine, *syn. de Linnéite.*
Kochélite, *var. de Fergusonite.*
Kochsalz, *syn. de Sel gemme.*
Koetlachbite, *résine fossile.*
Koehlérite, *syn. d'Onofrite.*

Kœlbingite, 505.
Koenénite, *chlorure hydr. de Mg, Al.*
Koenigite, *syn. de Brochantite.*
Kokscharowite, *var. d'Edenite.*
Kolosorukite, *var. de Jarosite.*
Kongsbergite, *var. d'Amalgame.*
Königine, *syn. de Brochantite.*
Koninckite, *phosphate ferrique hydraté.*

Könleinite, **Könlite**, 676.
Koodilite, *var. de Thomsonite.*
Koppite, *Pyrochlore à Fl, sans Ti ni Th.*
Korarfvéite, *phosphate fluoré de Ce.*
Koréite, *syn. d'Agalmatolite.*
Korite, *var. de Palagonite.*
Kornélite, *sulfate ferrique hydraté.*
Kornerupine, *var. de Prismatine.*
Kornite, *var. de Pétrosilex.*
Korynite, *v. Corynite.*

Kotschubéite, 544.

Köttigite, 629.
Koulibinite, *var. de Rétinite.*
Koupholite, *v. Coupholite.*
Krablite, *var. de feldspath potassique.*
Kruntzite, *résine fossile.*
Kraurite, *syn. de Dufrénite.*
Kreitonite, *v. Creittonite.*

Kremersite, 619.

Krennérite, 669.
Kreuzstein, *syn. d'Harmotome.*
Krisuvigite, *syn. de Brochantite.*
Kroebérite, *Pyrite très magnétique.*
Krokoit, *syn. de Crocoise.*
Krohnkite, Kronnkite, *sulfate hydr. de Cu, Na.*
Krugite, *var. de Polyhalite.*
Kryptolite, *alt. de Prismatine.*
Ktypéite, *carbonate de Ca des pisolithes de Carlsbad.*
Kubéite, *sulfate hydr. de Fe, Mg.*
Kuboit, *v. Cuboite.*
Kuhnite, *syn. de Berzéliite.*
Kunzite, *var. de Spodumene.*

Kupaphrite, *syn. de Tirolite.*
Kupferantimonglanz, *syn. de Chalcostibite.*
Kupferblau, *var. de Chrysocolle.*

Kupferblende, 651.
Kudferdiaspore, *var. de Lunnite.*
Kupferglanz, *syn. de Chalcosine.*
Kupferglimmer, *syn. de Chalcophyllite.*
Kupfergrün, *syn. de Chrysocolle.*
Kupferindig, *syn. de Covelline.*
Kupférite, *v. Kupfférite.*
Kupferkies, *syn. de Chalcopyrite.*
Kupferlasur, *syn. d'Azurite.*
Kupfermanganerz, *var. cuprifère de Lampadite.*

Kupfernickel, 622.
Kupferpecherz, *mél. de Limonite et Chrysocolle.*
Kupferphyllit, *syn. de Chalcophyllite.*
Kupfersammeterz, *syn. de Lettsomite.*
Kupfersand, *syn. d'Atacamite.*
Kupferschaum, *syn. de Tyrolite.*
Kupferschwärze, *var. cuprifère de Lampadite.*
Kupfersinter, *syn. de Chrysocolle.*
Kupfersmaragd, *syn. de Dioptase.*
Kupferuranit, *syn. de Chalcolite.*
Kupfervitriol, *syn. de Cyanose.*
Kupferzinkblüthe, *syn. de Risseite.*
Kupferwismuthglanz, *syn. d'Emplectite.*
Kupffërite, *var. peu ferreuse d'Anthophyllite*
Küstelite, *Argent aurifère.*
Kylindrite, *v. Cylindrite.*
Kyrosite, *var. de Marcasite avec As et Cu.*

L

Laavénite, *v. Lovénite.*

Labrador, Labradorite, 463.
Lacroisite, *mél. de Rhodochrosite et Rhodonite.*
Lagonite, Lagunite, *borate hydr. de Fe.*

Lampadite, 604.
Lamprite, *syn. de Schreibersite.*
Lamprophane, *sulfate de Pb avec Ca et alcalis.*
Lamprostibiane, *antimoniate de Fe, Mn.*

Lanarkite, 636.
Lancastérite, *mél. d'Hydromagnésite et Brucite.*
Langbanite, *silico-antimoniate de Mn, Fe.*
Langbeinite, *sulfate anhydre de K, Mg.*

Langite, 655.
Langstaffite, *syn. de Chondrodite.*
Lansfordite, *carbonate hydr. de Mg.*
Lanthanite, *carbonate hydr. de La.*
Lanthanocérite, *var. de Cérérite.*

Lapis-Lazuli, 470.
Larderellite, *borate hydr. d'Am.*

Lardite, 549.
Lasionite, *syn. de Wavellite.*

Lassallite, *syn. de Pilolite.*
Lasulith, *syn. de Klaprothine.*
Lasurapatite, *Apatite bleue.*
Lasurfeldspath, *var. d'Orthose avec Outremer.*

Lasurite, 471 : *employé aussi comme syn. de Lapis-Lazuli.*
Lasuroligoclase, *syn. de Lasurfeldspath.*
Lasurstein, *syn. d'Outremer.*
Latialite, *syn. d'Haüyne.*
Latrobite, *var. d'Anorthite.*
Laubanite, *zéolite voisine de Stilbite.*

Laumonite, Laumontite, 517.

Laurionite, 642.
Laurite, *sulfure de Ru et Os.*
Lautarite, *iodate de Ca.*
Lautite, *arséniosulfure d'Ag et Cu.*
Lavendulane, Lavendulite, *arséniate cuprifère de Co, produit d'alt.*
Lavezstein, *syn. de Pierre ollaire.*
Lawrencite, *protochlorure de fer.*
Lawroffite, Lawrowite, *var. de Diopside vanadifère.*
Lawsonite, *Carpholite à Ca.*

Laxmannite, 641.

Lazulite, 584.
Lazurite, *syn. de Lapis-Lazuli ; aussi employé comme syn. de Klaprothine.*
Lazurstein, *v. Lasurstein.*

Leadhillite, 637.
Leberblende, *syn. de Voltzine.*
Lebererz, *Cinabre bitumineux.*

Leberkies, 611.
Leberstein, *syn. de Pyrite.*
Lecontite, *sulfate hydr. de K, Na, Am.*
Ledererite, *var. de Gmélinite.*
Lèdérite, *var. de Sphène.*
Ledouxite, Cu^4As.
Leedsite, *comb. d'Anhydrite et Barytine.*
Leelite, *var. de Pétrosilex.*
Lehmanite, *syn. de Zoïsite.*
Lehmannite, *syn. de Crocoïse.*
Lehrbachite, *séléniure de Pb et Hg.*
Lehuntite, *var. de Mésotype.*
Leidyite, *silicate hydr. d'Al, Fe, Ca, Mg.*
Leirochroïte, *syn. de Tyrolite.*
Lémanite, *v. Lehmanite.*
Lengenbachite, *sulfo-arséniure de Pb.*
Lennilite, *var. verte d'Orthose.*
Lentulite, *syn. de Liroconite.*

Lenzinite, 526.
Léonhardite, *var. de Laumontite.*
Léonite, *syn. d'Astrakanite à potasse.*
Léopardite, *var. d'Amazonite.*
Léopoldite, *syn. de Sylvine.*
Lépidochlore, *ver. de Ripidolite.*

Lépidocrocite, 616.

Lépidolite, 476.

Lépidomélane, 475.

Lépidomorphite, *syn. de Muscovite.*
Lépidophæite, *var. de Wad.*
Lépolite, *var. d'Anorthite.*

Leptochlorites, 543, 545.
Leptonématite, *var. de Braunite.*
Lerbachite, *séléniure de Pb, Ag.*
Lernilite, *var. de Vermiculite.*
Lesleyite, *mél. de Corindon et Damourite.*

Lettsomite, 654.
Leucantérite, *alt. de Copperasine.*
Leucaugite, *esp. de Pyroxène.*

Leuchtenbergite, 544.

Leucite, 467.
Leucochalcite, *arséniate hydr. de Cu.*
Leucocyclite, *var. d'Apophyllite.*
Leucolite, *syn. de Dipyre ; également employé comme syn. de Pycnite et aussi de Leucite.*
Leucomanganite, *syn. de Fairfieldite.*
Leucopétrite, *résine fossile.*

Leucophane, 490.
Leucophœnicite, *Humite à Mn.*
Leucophyllite, *var. de Muscovite.*

Leucopyrite, 612.
Leucosphénite, *silicate à Ti, Ba, Na.*
Leucotile, *silicate hydr. de Mg, Al, Fe.*

Leucoxène, 616.
Leukargyrite, *syn. de Panabase à Ag.*
Leuzit, *v. Leucite.*

Leverrierite, 528.
Léviglianite, *sulfoséléniure de Hg, Zn, Fe.*

Lévyne, 516.
Lewisite, *titano-antimoniate de Ca, Fe.*

Libethénite, 655.

Liebenérite, 469.
Liebigite, *carbonate hydr. d'U, Ca.*

Liège de montagne, 502.
Lievingite, *arséniosulfure de Pb.*

Liévrite, 542.

Lignite, 675.

Ligurite, 480.
Lilalite, *syn. de Lépidolite.*
Lillhammérite, *syn. de Pentlandite.*
Lillianite, $Pb^3 Bi^2 S$.
Lillite, *var. d'Hisingérite.*
Limbachite, *var. de Cérolite.*
Limbilite, *alt. de Péridot (ou pâte vitreuse de Limburgite).*
Limnite, *var. phosphoreuse et humifère de Limonite.*

Limonite, 616.

Linarite, 636.
Lincolnite, *var. de Heulandite.*
Lindachérite, *arséniosulfate hydr. de Ca, Ni, Fe.*
Lindésite, *syn. d'Urbanite.*
Lindsayite, Lindséite, *var. alt. d'Anorthite.*
Linnæeite, *v. Linnéite*

Linnéite, 619.
Linséite, *v. Lindsayite.*
Lintonite, *var. de Thomsonite.*
Lionite, *var. siliceuse de Tellure.*
Liparite, *var. de Talc.*
Lirocomalachite, *v. Liroconite.*

Liroconite, 656.
Liskeardite, *var. arsenicale d'Evansite.*
Litharge, *syn. de Massicot.*
Lithidionite, Litidionite, *mel. de Quartz et de carbonate de K, Na.*
Lithionglimmer, *syn. de Lithionite.*

Lithionite, 476.
Lithiophilite, *var. manganésifère de Triphyline.*
Lithiophorite, *var. lithinifère de Psilomélane.*
Lithiophyllite, *v. Lithiophilite.*
Lithite, *syn. de Pétalite.*

Lithomarge, 526.
Lithoxyle, *bois silicifié.*
Livingstonite, *sulfoantimoniure de Hg.*
Loboïte, *var. magnésienne d'Idocrase.*
Loganite, *var. de Clinochlore ou de Pennine.*

Löllingite, 612.
Lomonite, *v. Laumontite.*
Lonchidite, *mél. de Marcasite et Mispickel.*
Longbanite, *v. Langbanite.*
Lophoïte, *syn. de Ripidolite.*
Lorandite, *sulfoarséniure de thallium.*
Loranskite, *tantalo-zirconate de Ce, Ca.*
Lorenzite, *silicate à Ti, Zr, Na.*
Lossenite, *arséniosulfate hydr. de Fe, Pb.*
Lotalite, *var. d'Hédenbergite.*
Lotrite, *esp. voisine de Prehnite.*
Louisite, *silicate hydr. de K, Na, Ca, Al, Mg, Fe.*
Lovanite, *v. Lovénite.*
Lövéite, *v. Löwéite.*
Lovénite, *silizirconate hydr. de Fe, Mn, Ca, Na.*

Löwéite, 579.
Löwigite, *var. d'Alunite.*
Loxoclase, *Orthose injecté d'Albite.*
Lucasite, *syn. de Vermiculite ou Jefferisite.*
Luchssapphir, *syn. de Cordiérite.*
Luckite, *var. manganésifère de Mélantérie.*
Lucullane, Lucullite, *syn. d'Anthraconite.*
Ludlamite, *phosphate hyd. de Fe.*
Ludwigite, *borate de Fe, Mg.*
Lunebergite, *phosphate hydr. de Mg.*

Lunnite, 655.

Lussatite, 447.

Lutécine, 447.

Lutécite, 447.
Luzonite, *var. de Clarite ou d'Enargite.*

Lydien (Quartz), Lydite, 449.
Lyellite, *syn. de Devilline.*
Lythrodes, *var. alt. d'Eléolite.*

M

Macfarlanite, *arséniure d'Ag, Co, Ni (mel. de Huntilite, Animikite, etc.).*
Mackinstoshite, *esp. vois. de Thorogummite.*

Macle, 522.
Maclureite, *syn. d'Augite; également employé comme syn. de Chondrodite.*
Maconite, *alt. de Chlorite.*

Magnéferrite, **Magnésioferrite**, 614.
Magnésie boratée, *syn. de Boracite.*
Magnésie carbonatée, *syn. de Giobertite.*

Magnésite (silicate), 549.

Magnésite (Giobertite), 571.
Magnet, Magneteisenerz, Magneteisenstein, *syn. de Magnétite.*

Magnétite, 613.
Magnetkies, *syn. de Pyrrhotine.*
Magnétopyrite, *syn. de Pyrrhotine.*
Magnetostibiane, *antimoniate de Mn, Fe.*
Magnochromite, *var. très magnésienne de Chromite.*

Magnoferrite, 614.
Magnofranklinite, *variété très magnétique de Franklinite.*
Magnolite, *tellurate de Hg; alt. de Coloradoïte.*
Makite, *var. de Thénardite.*

Malachite, 652.

Malacolite, 495.

Malacon, 490.
Maldonite, *or bismuthifère.*
Malinofskite, Malinowskite, *var. de Panabase plombifère.*
Mallardite, *silicate hydr. de Mn.*
Maltesite, *var. d'Andalousite.*

Malthacite, 529.

Malthe, 677.
Mamanite, *var. de Polyhalite.*
Mancinite, *var. de Willémite.*
Manganamphibole, *syn. de Rhodonite.*
Manganapatite, *Apatite à Mn.*
Manglanbei, *hydroxyde de Mn, Pb, Fe, Cu.*
Manganblende, *syn. d'Alabandine.*
Manganbrucite, *Brucite à Mn.*
Mangandisthène, *syn. d'Ardennite.*
Manganépidote, *syn. de Piémontite.*
Manganèse carbonaté, *syn. de Dialogite.*

Manganèse oxydé barytifère, 603.
Manganglanz, *syn. d'Alabandine.*
Mangangraphite, *syn. de Wad.*
Manganhédenbergite, *Hédenbergite à Mn.*
Manganhisingérite, *Hisingérite à Mn.*
Manganidocrase, *Idocrase à Mn.*

Manganite, 603.
Mangankies, *syn. d'Hauérite.*

Mésitine, 571.

Mésole, 512.

Mésoline, 516.

Mésolite, 512.
Mésolite d'Hauenstein, *var. de Thomsonite.*
Mésolitine, *syn. de Thomsonite.*

Mésotype, 509.
Mésotype épointée, *syn. d'Apophyllite.*
Messelite, *orthophosphate hydr. de Fe, Ca.*
Messingblüthe, Messingite, *syn. de Risseite.*
Métabrushite, *var. de Brushite.*
Métachlorite, 545.

Métacinnabarite, 660.
Métagadolinite, *alt. de Gadolinite.*
Métalonchidite, *var. arsénifère de Marcasite.*
Métanatrolite, *alt. de Natrolite par la chaleur.*
Métanocérite, *var. de Nocérite.*
Métaperowskite, *alt. de Perowskite.*
Métaséricite, *var. de Muscovite.*
Métastibnite, *var. de Stibine.*
Métavoltine, *sulfate hydr. de K, Na, Fe.*

Métaxite, 551.
Métaxoïde, *var. de Ridipolite.*

Meulière, 448.
Meymacite, *alt. de Scheelite.*

Miargyrite, 665.
Miascite, *mél. de Strontianite et Calcite.*

Mica, 472.

Mica triangulaire, 543.
Micachlorite, *var. de Clinochlore.*
Micaphilite, Micaphyllite, *syn. d'Andalousite.*
Micarelle, *var. douteuse de Wernérite ou de Pinite.*
Michaélite, *var. d'Opale.*
Michaelsonite, *syn. d'Erdmannite.*
Michel-Lévyte, *var. de Barytine.*
Microbromite, *chlorobromure d'Ag pauvre en brome.*

Microcline, 456.
Microclinperthite, *Microcline avec lamelles d'albite.*
Microlite, *Pyrochlore tantalifère.*

Microperthite, 457.
Microplakite, *var. de Labrador.*
Microphyllite, *id.*
Microschörlite, *Tourmaline microscopique.*
Microsommite, *var. de Sodalite.*
Middletonite, *résine fossile.*
Miémite, *var. de Dolomie.*
Miersite, *iodure d'Ag à symétrie tétraédrique.*
Miesite, *var. de Pyromorphite.*
Mignumite, *var. de Magnétite.*
Milanite, *var. d'Halloysite.*

Milarite, 472.

Millérite, 621.

Miloschine, 529.

Mimétène, *v. Mimétèse.*

Mimétèse, **Mimétite**, 638.
Mine d'amadou, *var. de Jamesonite.*

Mine de plomb, 673.
Minervite, *phosphate hydraté d'Al, K, avec Am, Ca, Mg.*

Minium, 635, 660.
Mionite, *v. Méionite.*

Mirabilite, 577.
Miriquite, *phosphoarséniate hydraté de Pb, Fe.*
Misénite, *sulfate hydr. de K.*

Mispisckel, Misspickel, 612.
Misy, Misylite, *syn. de Copiapite ou de Jarosite.*
Mitchellite, *var. de Chromite à Mg.*
Mixite, *arséniate hydr. de Cu et Bi.*

Mizzonite, 538.
Modumite, *syn. de Skutterudite.*
Moffrasite, *syn. de Bleinière.*
Mohawkite, *arséniure de Cu, Ni, Co.*
Mohsine, *syn. de Leucopyrite ou de Löllingite.*
Mohsite, *var. d'Ilménite.*
Moissanite, *siliciure de C, météoritique.*
Mokkastein, *syn. d'Agate mousseuse.*
Molarite, *syn. de Meulière.*
Moldavite, Moldawite, *var. d'Obsidienne ; employé aussi pour une var. d'Ozocérite.*
Mollite, *syn. de Klaprothine.*
Molybdänglanz, *syn. de Molybdénite.*
Molybdänocher, *syn. de Molybdénocre.*

Molybdénite, 599.

Molybdénocre, **Molybdine**, **Molybdite**, 598.
Molybdoferrite, *molybdate impur de Fe.*
Molybdoménite, *sélénite de Pb.*
Molybdophyllite, *Barysilite hydratée.*
Molybdurane, *molybdate d'U.*

Molysite, 619.

Monazite, 583.
Monazitoïde, *var. de Monazite.*
Monétite, *phosphate hydr. de Ca.*

Monheimite, 627.
Monimolite, *antimoniate de Pb, Fe, Ca, Mg, Mn.*
Monite, *syn. de Collophane.*
Monophane, *syn. d'Epistilbite.*
Monradite, *alt. de Pyroxène.*
Monrolite, *var. de Sillimanite.*
Montanite, *tellurate hydraté de Bi.*

Montebrasite, 585.

Monticellite, 508.
Montmartrite, *syn. de Gypse.*

Montmorillonite, 529.
Montroydite, *HgO.*
Monzonite, *var. compacte de Grossulaire.*
Mooraboolite, *zéolite voisine de Natrolite.*
Morasterz, *syn. de Limonite.*

N

Polychrome, *syn. de Pyromorphite.*

Polycrase, 588.
Polydymite, *syn. de Beyrichite.*

Polyhalite, 579.
Polyhydrite, *silicate très hydraté de Fe.*
Polylite, *var. noire de Pyroxène.*
Polylithionite, *var. de Zinnwaldite.*

Polymignite, 587.
Polysphérite, *var. de Pyromorphite.*
Polytélite, *var. argentifère de Panabase; employé comme syn. de Freibergite.*
Polyxène, *syn. de Platine natif.*

Ponce, 455.
Poonahlite, *var. de Scolésite.*
Porcellanite, *syn. de Passauite; désigne aussi une argile dure jaspoïde.*
Porcellophite, *var. de Serpentine.*

Porpézite, 668.
Porricine, *var. de Pyroxène.*
Portite, *alt. de Cordiérite.*
Porzellanit, Porzellanspath, *v. Porcellanite.*
Posepnyte, *résine fossile.*
Powellite, *molybdotungstate de Ca.*
Prase, *Quartz vert-poireau avec Actinote.*

Praséolite, 479.
Prasilite, *var. de Chlorophæite.*
Prasine, *syn. d'Ehlite.*
Prasochrome, *var. de Calcaire à Cr.*
Prasolite, *var. fibreuse de Chlorite.*
Prazin-chalcite, *v. Prasine.*
Predazzite, *mél. de calcaire et Brucite.*
Pregrattite, *var. de Paragonite.*

Prehnite, 517.
Prehnitoïde, *var. de Dipyre.*

Priceite, 561.
Prilépite, *var. d'Allophane.*
Prismatine, *silicate d'Al, Mg.*
Prixite, *arséniate hydr. de Pb?*
Prochlorite, *syn. de Ripidolite.*
Proidonite, *fluorure de silicium.*
Prolectite, *var. de Chondrodite.*

Prosopite, 592.
Protéite, Prothéite, *var. de Salite.*

Protobastite, 499, 500, 550.
Protochlorites, *groupe des Chlorites les moins riches en silice.*
Protolithionite, *mica à Li et Fe.*
Protonontronite, *silicate hydr. de Al, Fe, Mn, Mg.*
Protovermiculite, *var. de Chlorite.*

Proustite, 664.

Prunnérite, 569.
Przibramite, *var. de Goethite; désigne aussi la Blende cadmifère.*

Psathurose, **Psaturose**, 663.
Psathyrite, *syn. de Xylorétine.*
Pseudoalbite, *syn. d'Andésine.*
Pseudoandalousite, *var. de Disthène.*
Pseudoapatite, *pseudom. de Pyromorphite.*
Pseudoberzeliite, *arséniate de Ca, Mg, Mn.*
Pseudobiotite, *alt. de Biotite.*

Pseudoboléite, 658.
Pseudobrookite, *titanate ferrique* $2Fe^2O^3$, $3TiO^2$.

Pseudocalcédonite, 447.
Pseudocampylite, *var. de Pyromorphite.*
Pseudochrysolite, *syn. d'Obsidienne.*
Pseudocotunnite, *chlorure de Pb avec alcalis.*
Pseudodiallage, *var. de Diallage.*
Pseudogaylussite, *alt. de Gay-Lussite.*
Pseudoleucite, *alt. de Leucite en Eléolite et Orthose.*
Pseudolibéthénite, *phosphate hydr. de Cu.*
Pseudolite, *var. de Talc pseudom. de Spinelle.*

Pseudomalachite, 655.
Pseudomésolite, *var. de Mésolite à axes opt. très rapprochés.*
Pseudonatrolite, *zéolite calcifère.*
Pseudonéphéline, *var. de Néphéline.*
Pseudonéphrite, *var. de Pagodite.*
Pseudonocérine, *fluorure mal défini, voisin de Nocérine.*
Pseudophite, *var de Loganite.*
Pseudophillipsite, *var. de Phillipsite peu riche en silice.*
Pseudopyrophyllite, *silicate hydr. d'Al, Mg.*
Pseudoscapolite, *Pyroxène pseudom. de Wernérite.*
Pseudosommite, *var. de Néphéline.*
Pseudostéatite, *var. impure d'Halloysite.*
Pseudotridymite, *Tridymite à densité du Quartz.*
Pseudotriplite, *alt. de Triphyline.*

Psilomélane, 603.
Psimythite, *syn. de Leadhillite.*
Psittacinite, *vanadate hydr. de Pb, Cu.*
Ptérolite, *mél. de mica noir avec divers minéraux.*
Pilolite, *silicate hydr. d Al, K, Na, Ca.*
Puchérite, *vanadate de Bi.*

Puflérite, 515.
Pumite, *syn. de Ponce.*
Purpurite, *phosphate hydr. de Mn, Fe.*

Puschkinite, 541.

Pycnite, 486.
Pycnochlorite, *chlorite compacte, riche en fer.*
Pycnotrope, *silicate hydr. d'Al, Mg, K, vois. de Serpentine.*
Pyrallolite, *alt. de Pyroxène.*
Pyrantimonite, *syn. de Kermésite.*
Pyraphrolite, *mél. de feldspath et d'Opale.*

Pyrargillite, 479.

Pyrargyrite, 664.
Pyrauxite, *syn. de Pyrophyllite.*

Pyrénéite, 531.

(1) Chercher à R ce qui ne se trouvera pas avec Rh.

Reichite, *var. de Calcite.*
Reinite, *tungstate de fer.*
Reissachérite, *var. de Wad.*
Reissblei, *syn. de Graphite.*
Reissite, *syn. d'Epistilbite; employé aussi pour Reussite.*
Remingtonite, *carbonate hydr. de Co.*
Remolinite, *syn. d'Atacamite.*
Rensselaerite, *Talc pseudom. d'Enstatite.*
Résanite, *silicate hydr. de Cu et Fe.*

Résines, 677.

Résinite, 450.
Restormélite, *var. de Smectite ou d'Agalmatolite.*

Rétinalite, 551.

Rétinasphalte, 678.
Rétinellite, *hydrocarbure contenu dans Rétinasphalte.*

Rétinite, 455; *employé aussi pour Rétinasphalte et pour Copalite.*
Retzbanyite, Rezbanyite, *var. de Cosalite.*
Retziane, *arséniate hydr. de Mn, Ca.*
Retzite, *syn. d'Edelforsite.*
Reussine, *mél. de sulfate de Na et de sulfate de Mg.*
Reussinite, *résine fossile.*
Revdanskite, Revdinite, *silicate hydr. impur de Ni.*
Rhabdite, *phosphure de Fe météoritique.*
Rhabdophane, *phosphate hydr. de Ce, Di, Er, etc.*
Rhagite, *arséniate hydr. de Bi.*

Rhætizite, 524.
Rhodalite, *var. de Bol.*
Rhodalose, *syn. de Biebérite.*

Rhodite, 668.

Rhodizite, 562.
Rhodoarséniane, *arséniate hydr. de Mn, Ca, Mg.*
Rhodochrome, *var. chromifère de Kämmererite.*

Rhodochrosite, 605.
Rhodoïse, *mél. d'Erythrine avec acide arsénieux.*
Rhodolite, *var. rose de grenat, associée au Corindon.*

Rhodonite, 606.
Rhodophyllite, *var. de Kämmererite, rouge en écailles minces.*
Rhodophosphite, *chlorophosphate de Ca, Mn, Fe avec SO^3.*
Rhodotilite, *syn. d'Inésite.*
Rhodusite, *var. asbestiforme de Glaucophane.*
Rhombarsénite, *syn. de Claudétite.*

Rhombenglimmer, 474.
Rhyacolite, *mél. d'Orthose et Néphéline.*
Richellite, *fluophosphate hydr. d'Al, Fe, Ca.*
Richmondite, *var. d'Hydrargillite (Gibbsite).*

Richterite, 503.

Rickardite, *tellurure de Cu.*
Ridolfite, *var. de Dolomie.*

Riebeckite, 504.
Riemannite, *syn. d'Allophane.*
Rinkite, *silicotitanate de Ca avec Ce, La, Di et Na, Fl.*
Riolite, Rionite, *sulfoséléniure d'Hg.*
Rionite, *var. de Tennantite à Bi.*

Ripidolite, 545.
Riponite, *var. de Mizzonite (Dipyre).*
Risséite, *var. d'Aurichalcite.*
Rittingérite, *esp. identique avec Xanthoconite.*
Rivotite, *antimoniocarbonate de Cu.*
Rochlandite, *v. Rocklandite.*
Rochlédérite, *résine fossile.*
Rocklandite, *var. de Serpentine.*
Roeblingite, *silicate hydr. de Pb, Ca, avec sulfite.*
Roemérite, *sulfate hydr. de Fe.*
Roeppérite, *var. de Péridot à Zn; employé aussi comme syn. de Rhodochrosite calcifère.*
Roesslérite, *arséniate hydr. de Mg.*
Roettisite, Roettizite, *var. amorphe de Connarite.*
Rogersite, *alt. de Samarskite et d'Euxénite.*

Romanzowite, 531.

Roméine, Roméite, 586.
Roscoélite, *var. de Lépidolite avec Va.*
Roséite, *alt. de Mica.*
Rosélite, *arséniate hydr. de Ca, Mg, Co.*
Rosellane, *syn. de Rosite.*
Rosenbuschite, *silicate de Ca, Na, Zn, Ti, La, de la famille du pyroxène.*
Rosite, *var. de Pinite; s'emploie aussi comme syn. de Chalcostibite.*
Rosstrévorite, *var. fibreuse d'Épidote.*
Rostérite, *var. de Béryl.*
Rosthornite, *résine fossile.*
Rothbleierz, *syn. de Crocoïse.*

Rothgültigerz (dunkles), 664.

Rothgültigerz (lichtes), 665.
Rothkupfererz, *syn. de Cuprite.*
Rothnickelkies, *syn. de Nickéline.*

Rothoffite, 533.
Rothspiessglanzerz, Rothspiessglaserz, *syn. de Kermésite.*
Rothstein, *syn. de Rhodonite.*
Rothzinkerz, *syn. de Zincite.*
Röttizite, *v. Roettizite.*
Roubschite, *syn. de Giobertite.*
Roumanite, *résine fossile.*
Rowlandite, *silicate d'Y.*
Rubasse, *Quartz coloré artificiellement.*
Rubellane, *alt. de Biotite.*

Rubellite, 484.
Rubérite, *syn. de Cuprite.*

Rubicelle, 559.

Rubinglimmer, 616.

Spinellane, *syn. de Noséane.*

Spinelle, 559.

Spinthère, 480.

Spodiophyllite, *silicate vois. d'Ægirine.*

Spodiosite, $3\,Ca^2\,P^2\,O^8 - Ca\,Fl^2$; *Apatite pseudom. de Wagnérite.*

Spodumène, 471.

Spreustein, *syn. de Paranthine.*

Sprödglanzerz, Sprödglaserz, *syn. de Stephanite.*

Sprudelstein, *var. d'Aragonite.*

Staffélite, *var. d'Hydroapatite.*

Stagmatite, *chlorure de fer météorique.*

Stahlstein, *syn. de Sidérose.*

Stanékite, *résine fossile.*

Stangenschorl, 481.

Stangenspath, 575.

Stangenstein, 486.

Stannine, 630.

Stannite, *mél. de Cassitérite et Quartz; employé aussi comme syn. de Stannine.*

Stannolite, *syn. de Cassitérite.*

Stanzaïte, *var. d'Andalousite.*

Stassfurtite, *var. terreuse de Boracite.*

Staurobaryte, *syn. d'Harmotome.*

Staurolite, *syn. de Staurotide et aussi d'Harmotome.*

Staurotide, 524.

Stéargillite, 529.

Stéatargilite, *minéral chloritique mal défini.*

Stéatite, 549.

Stéatite de Snarum, *var. de Pennine.*

Steeleite, Steelite, *alt. de Morénite.*

Steenstrupine, *silicate voisin de Mélanocérite.*

Steinheilite, *syn. de Cordiérite.*

Steinkohle, *syn. de Houille.*

Steinmannite, 633.

Steinmark, 526.

Steinöl, *syn. de Naphte.*

Steinsalz, *syn. de Sel gemme.*

Stellarite, *var. d'Asphalte.*

Stellite, *var. de Pectolite ou alt. de Wollastonite.*

Stelznérite, *sulfate basique de Cu.*

Stéphanite, 663.

Stephensonite, *hydro-sulfocarbonate de cuivre.*

Stercorite, 580.

Sterlingite, *var. de Damourite; employé aussi comme syn. de Zincite.*

Sternbergite, 662.

Stetefeldtite, *var. de Partzite.*

Stevensite, *alt. de Pectolite.*

Stiberite, *var. d'Ulexite.*

Stibferrite, *v. Stibioferrite.*

Stibianite, *Stibine hydratée.*

Stibiatile, *antimoniate de Mn, Fe.*

Stibiconise, *syn. de Stiblite.*

Stibine, 597.

Stibioferrite, 586.

Stibiogalénite, *syn. de Bleinière.*

Stibiohexargentite, Stibiotriargentite, *var. de Dyscrase.*

Stibiotantalite, *minéral à Ta, Sb, Nb.*

Stiblite, 598.

Stibnite, *syn. de Stibine.*

Stigmite, *var. d'Agate.*

Stilbite, 515.

Stillolite, *var. d'Opale.*

Stilpnomélane, 545.

Stilpnosidérite, *var. de Limonite.*

Stipite, *var. de Houille.*

Stirlingite, *syn. de Roeppérite.*

Stoffertite, *silicate vois. de Métabrushite.*

Stokésite, *silicate hydr. de Na, Ca, Sn.*

Stolpénite, *var. de Montmorillonite.*

Stolzite, 641.

Strahlbaryt, *syn. de Barytine.*

Strahlenerz, *syn. d'Aphanèse.*

Strahlenkupfer, *var. d'Aphanèse.*

Strahlite, *syn. d'Actinote.*

Strahlkies, *syn. de Marcasite.*

Strahlstein, 502.

Strahlzeolith, *syn. de Stilbite.*

Strakonitzite, *var. alt. d'Augite.*

Stratopéite, *alt. de Rhodonite, syn. de Néotocite.*

Strelite, *Syn. d'Anthophyllite.*

Strengite, *phosphate hydr. de Fe.*

Striegisane, *var. de Wavellite.*

Strigovite, *var. de Thuringite.*

Strogonowite, 536.

Stromeyérite, 662.

Stromite, *var. de Dialogite.*

Stromnite, *syn. de Barytostrontianite.*

Strontiane carbonatée, *syn. de Strontianite.*

Strontiane sulfatée, *syn. de Célestine.*

Strontianite, 563.

Strontianocalcite, *var. de Calcite à Sr.*

Strüvérite, *syn. de Chloritoïde.*

Struvite, 580.

Stübélite, *var. d'Hisingérite.*

Studerite, *var. de Panabase à As et Zn.*

Stützite, *tellurure d'argent.*

Stüvénite, *alun de Na, Mg.*

Stylobate, *syn. de Gehlénite.*

Stylotype, *var. de Panabase.*

Styptérite, *syn. d'Alunogène.*

Stypticite, *syn. de Fibroferrite.*

Subdelessite, *var. de Delessite.*

Succin, Succinite, 678.

Succinellite, *résine fossile.*

Succinite (Grenat), 531.

Suif minéral, 676.

Sulfatallophane, *var. d'Allophane.*

Sulfohalite, *v. Sulphohalite.*

T

Ternärbleierz, *syn. de Leadhillite.*
Terra sigillata, *syn. de Sphragide.*

Terre à foulon, 529.

Terre à porcelaine, 527.

Terre d'ombre de Cologne, 675.

Terre de pipe, 527.
Terre de Sienne, *var. d'Ocre.*

Terre verte, 521, 545.

Teruelite, 571.
Teschemachérite, *carbonate hydr. d'ammoniaque.*

Tessélite, 514.
Tesseralkies, *syn. de Skutterudite.*
Tétalite, *var. de Calcite à Mn.*
Tétartine, *syn. d'Albite.*
Tétraclasite, *syn. de Méionite.*

Tétradymite, 643.

Tétraédrite, Tétrahédrite, 649, 650.
Tétragophosphite, *phosphate d'Al, de Mn, Mg, Cu.*
Tétraphyline, *var. de Triphyline.*
Texalite, *syn. de Brucite.*

Texasite, 623.
Thalackérite, *var. d'Anthophyllite.*
Thalassite, *chlorure hydr. de Cu avec carbonate.*
Thalénite, *silicate hydr. d'Yttria.*
Thalheimite, *syn. de Mispickel.*
Thalite, *var. de Saponite.*
Thallite, *syn. d'Epidote.*
Tharandite, *var. de Dolomie.*
Thaumasite, *assoc. de carbonate, sulfate et silicate de Ca avec eau.*

Thénardite, 574.

Thermonatrite, 572.
Thermophyllite, *var. de Serpentine.*
Thierschite, *var. de Whewellite.*
Thinolite, *tuf calcaire pseudomorphique.*
Thjorsauite, *var. d'Anorthite.*
Thomaïte, *var. de Junckérite.*

Thomsenolite, 592.

Thomsonite, 511.
Thon, *syn. d'Argile.*
Thoneisenstein, *syn. de Limonite.*
Thorianite, *oxyde de Th et U.*

Thorite, 491.
Thorogummite, *Thorite uranifère.*
Thorouraninite, *syn. de Bröggerite.*
Thraulite, *var. de Gillingite.*
Thrombolite, *antimoniate hydr. de Cu.*
Thuenite, *var. d'Ilménite.*

Thulite, 542.
Thumerstein, Thumite, *syn. d'Axinite.*

Thuringite, 545.

Tiemannite, 659.
Tiffanyite, *hydrocarbure du diamant.*

Tilasite, *Adélite fluorifère.*
Tilkerodite, *Clausthalite à Co.*

Tincal, Tinkal, 561.
Tincalconite, *var. pulvérulente de Borax.*
Tincalzite, *var. d'Ulexite.*
Tirolite, *v. Tyrolite.*
Titane oxydé, *syn. de Rutile.*
Titane oxydé ferrifère, *syn. d'Ilménite.*
Titane silicéo-calcaire, *syn. de Sphène.*
Titaneisen, *syn. d'Ilménite.*
Titanioferrite, *syn. d'Ilménite.*

Titanite, 480; *employé aussi comme syn. de Rutile.*
Titanolivine, *péridot titanifère (ou Humite).*
Titanomorphite, *var. de Sphène.*
Tobermorite, *silicate hydr. de Ca, voisin de Gyrolite.*
Tocornalite, *iodure d'Ag, Hg.*
Toenite, *fer nickelé météoritique.*
Tombazite, *var. de Disomose.*
Tomosite, *var. de Rhodonite.*

Topaze, 485.

Topaze brûlée, 486.

Topaze (fausse), 446.

Topaze orientale, 557.

Tapazolite, 532.
Topazosème, *Topaze en roche.*
Topfstein, *syn. de Pierre ollaire.*
Torbanite, *var. d'Asphalte.*
Torbérite, *v. Torbernite.*

Torbernite, 583.
Torrélite, *syn. de Columbite.*
Torrensite, *mél. de Dialogite et Rhodonite.*
Totaïgite, *alt. serpentineuse de Pyroxène*

Touche (Pierre de), 449.

Tourbe, 675.

Tourmaline, 481.
Towanite, *syn. de Chalcopyrite.*
Transvaalite, *alt. d'arséniure de Co.*
Traubenblei, *syn. de Pyromorphite.*
Trautwinite, *var. impure d'Ouwarowite.*
Traversellite, *var. de Diopside.*
Travertin, *calcaire concrétionné.*
Tremenheerite, *var. de Graphite.*

Trémolite, 501.
Trichalcite, *arséniate hydr. de Cu.*

Trichopyrite, 622.
Triclasite, *syn. de Fahlunite.*

Tridymite, 449.
Trimérite, *silicate de Mn, Be, Ca, Fe.*
Trinacrite, *syn. de Palagonite.*
Trinkérite, *résine fossile.*

Triphane, 471.
Triphanite, *var. d'Analcime.*

Triphyline, 606, 618.
Triphylite de Norwich, *var. de Triphyline.*

Triplite, 605, 618.

Vénérite, *silicate hydr. de Cu, Al, Mg, Fe, voisin de Bravaisite.*

Vermiculite, 476.
Vermontite, *syn. de Danaïte.*
Véronite, *syn. de Céladonite.*

Verre de Muscovie, 473, 476.
Verrucite, *var. de Thomsonite.*
Vesbine, *Vanadate d'Al.*
Vestane, *var. de Quartz.*
Vésuvianite, *v. Vésuvienne.*

Vésuvienne, 534.
Veszélyite, *arséniophosphate hydr. de Cu, Zn.*
Viandite, *var. d'Opale.*
Victorite, *var. d'Enstatite météoritique.*
Viellaurite, *mél. de Dialogite et Téphroïte.*

Vierzonite, 529.
Vietinghofite, *var. ferreuse de Samarskite.*
Vignite, *mél. de Magnétite avec carbonate et phosphate de fer.*

Villarsite, 508.
Villémite, *v. Willémite.*
Vilnite, *var. de Wollastonite.*
Violaïte, *Pyroxène très polychroïque.*

Violane, 498.
Violite, *syn. de Copiapite.*
Virescite, *syn. de Pyroxène vert.*
Viridite, *nom générique des silicates hydratés ferreux, manganeux, etc.*
Viridul, *var. de Calcédoine.*
Vitriol rouge, *syn. de Botryogène.*
Vitriol vert, *syn. de Mélantérie.*
Vitriolbleierz, *syn. d'Anglésite.*
Vitriolgelb, *syn. de Jarosite.*
Vitriolite, *syn. de Pisanite.*
Vitriolocher, *syn. de Pittizite.*

Vivianite, 618.
Vogésite, *syn. de Pyrope.*
Voglianite, *sulfate d'U, Fe, Cu, Ca.*
Voglite, *carbonate hydr. d'U, Ca, Cu.*
Voigtite, *alt. de Biotite.*
Voile de montagne, *var. d'Amiante.*

Volborthite, 657.
Volcanite, *soufre sélénié des volcans; employé aussi comme syn. de Pyroxène.*
Volgérite, *acide antimonique hydr., alt. de Stibine.*
Völknérite, *syn. d'Hydrotalcite.*
Voltaïte, *sulfate hydr. de Fe, Mg, K, Na.*
Voltzine, *oxysulfure de Zn.*
Von Diestite, *v. Van-Diestite.*
Voraulite, *syn. de Klaprothine.*

Vorhausérite, 551.
Vosgite, *var. alt. de Labrador.*
Vreekite, *v. Bhreckite.*
Vulpinite, *syn. d'Anhydrite.*

W

Wackenrodite, *var. plombifère de Wad.*
Wad, 604.
Wagite, *var. de Calamine.*

Wagnérite, 582.
Walaïte, *v. Valaïte.*

Walchowite, 678.
Waldheimite, *var. de Trémolite.*
Walkerde, Walkthon, *syn. de Smectite.*
Walkérite, *syn. de Pectolite.*
Walleriane, *var. de Hornblende noire.*
Wallérite, *v. Vallériite.*
Walmstedtite, *syn. de Giobertite à Mn.*
Walpurgine, *arséniate hydr. de Bi, U.*
Waltherite, *var. de Bismuthite.*
Waluéwite, *var. de Xanthophyllite.*
Wandstein, *syn. d'Ankérite.*
Wapplérite, *arséniate hydr. de Ca, Mg, triclinique.*
Wardite, *var. de Turquoise.*
Waringtonite, Warringtonite, *var. de Langite.*
Warrenite, *sulfoantimoniure de Pb, Fe.*
Warwickite, *borotitanate de Mg.*
Washingtonite, *syn. d'Hystatite.*
Wasite, *v. Vasite.*
Wasserblei, *syn. de Molybdénite.*
Wasserbleisilber, *var. de Wehrlite bismuthifère.*
Wasserchrysolith, *syn. d'Obsidienne.*
Wasserglimmer, *syn. de Pennine.*
Wasserkies, *syn. de Marcasite.*
Wattevillite, *sulfate hyd. d'alcalis et de Fe, Ni, Co.*

Wavellite, 583; *employé aussi comme syn. de Gibbsite.*
Webnérite, *Zinckénite à Ag; ident. avec Andorite.*
Webskyite, *alt. de Serpentine.*

Webstérite, 579.
Wehrlite, *d'abord regardée comme var. d'Ilvaïte; en réalité roche d'olivine, diallage et hornblende; désigne aussi un tellurure de Bi, voisin de Tétradymite.*
Weibyeïte, *fluocarbonate à Ce, La, Ca.*
Weichbraunstein, *syn. de Pyrolusite.*
Weicheisenkies, *syn. de Wasserkies.*
Weichmangan, *syn. de Pyrolusite.*

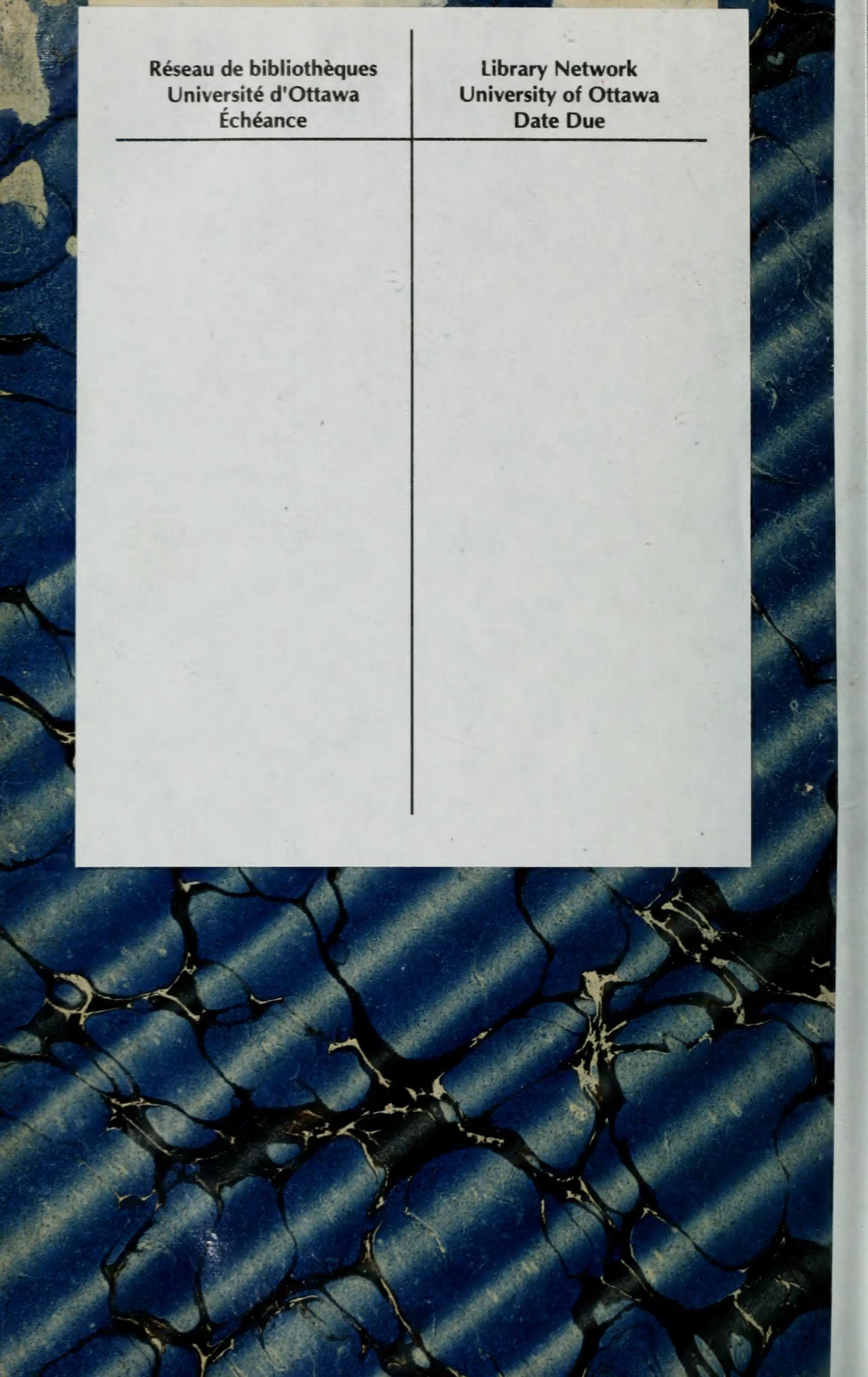
Weissbleierz, 635.
Weisserkies, *syn. de Marcasite.*
Weisserz, *var. de Leucopyrite.*
Weissgolderz, *syn. de Sylvanite.*
Weissgültigerz, *syn. de Polytélite; — également employé comme syn. de Freibergite.*
Weissiane, *syn. de Scolésite.*
Weissigite, *var. lithinifère d'Orthose.*

Weissite, 479.
Weisskupfer, *syn. de Domeykite.*
Weisskupfererz, *syn. de Marcasite arsenicale.*
Weissnickelkies, *syn. de Chloanthite; — également syn. de Rammelsbergite.*
Weissspiessglanzerz, *syn. d'Exitèle.*
Weisssylvanerz, *syn. de Sylvanite.*
Weisstellur, *syn. de Krennérite.*

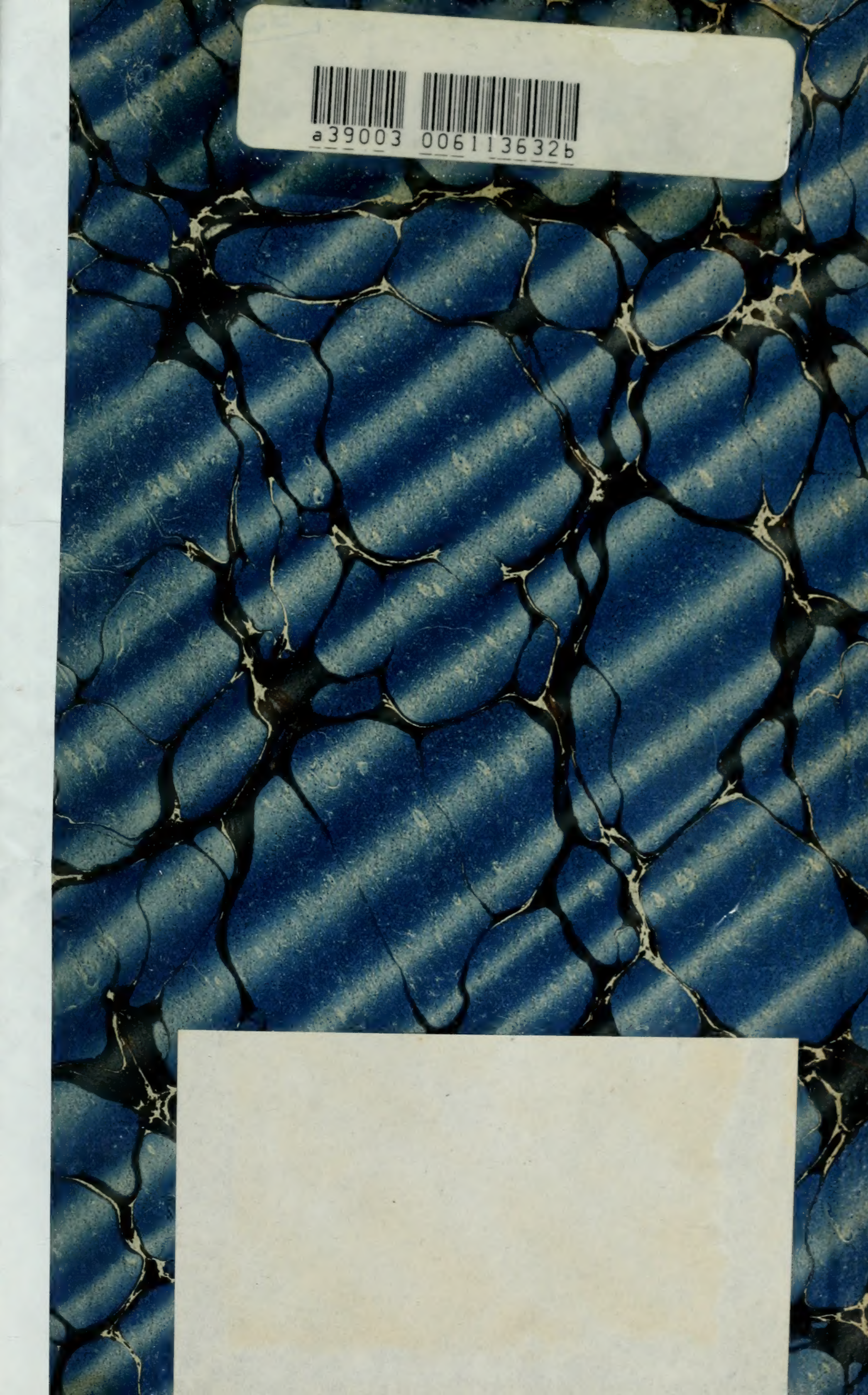
ERRATA

P. 33. Ligne 8 du bas : rétablir $\frac{1}{s}$ après $\frac{1}{r}$.
38. — 18 du haut : au lieu de OQK lire OQR.
47. — 21 du — — fig. 16 — fig. 17.
52. — 7 du — — N′ — N_1.
58. — 16 du — — OM — OM_1.
» — 7 du bas — *id.* — *id.*
81. Au tableau, au lieu de DICOHSYM... mettre DICHOSYM....
89. Ligne 11 du bas : au lieu de « de l'axe », lire « de l'arc ».
97. — 20 du haut : devant la parenthèse, lire $\frac{1}{2}$ au lieu de $\frac{2}{1}$.
122. — 14 du bas : au lieu de « palyèdres » lire « polyèdres ».
313. — 11 du haut : — $\frac{1}{q}a(+\alpha)$ — $\frac{1}{q}a(1+\alpha)$.
320. — 13 du bas : — « quatres » — « quatre ».
445. — 10 du haut : — « $n = 1{,}54423$ » — « $n_0 = 1{,}54423$ ».
483. — 8 du bas : — « ferrières » — « ferrifères ».
522. — 10 du haut : — $n = 1{,}643$ — $n_g = 1{,}643$.
523. — 2 du bas : — (n). — (n_p).
561. — 4 du haut : — n^o, n^e — n n_e.
562. — 20 du — — $n = 1{,}673$ — $n_g = 1{,}673$.
567. — 3 du — — $e/_4$ — $e^9/_4$.

1228-07. — Coulommiers. Imp. Paul BRODARD. — 12-07.



Réseau de bibliothèques Université d'Ottawa Échéance	Library Network University of Ottawa Date Due


a39003 006113632b

COLL ROW MODULE SHELF BOX POS C
333 14 05 05 02 03 4